



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΡΕΥΜΑΤΩΝ  
ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗ  
ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ**

**THE IMPACT OF VEGETATION IN THE STUDY OF GRAVITY  
CURRENTS WITH LARGE SALINITY IN A VALLEY**

υπό

**ΘΑΝΟ ΝΙΚΟΛΑΟ**

**ΤΣΙΝΤΣΙΦΑ ΛΥΣΙΜΑΧΟ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού 2020

© 2020 Θάνος Νικόλαος, Τσίντσιφας Λυσίμαχος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Κεραμάρης Ευάγγελος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
---------------------------------	--

Δεύτερος Εξεταστής	Λιακόπουλος Αντώνιος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
--------------------	--

Τρίτος Εξεταστής	Καρακασίδης Θεόδωρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
------------------	--

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Κεραμάρη Ευάγγελο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μας. Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητές κ. Λιακόπουλο Αντώνιο και κ. Καρακασίδη Θεόδωρο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον φίλο και συμφοιτητή μας Μαρτίδη Άγγελο για την πολύτιμη βοήθειά του στην βιντεοσκόπηση των πειραμάτων. Ακόμη, θα θέλαμε να απευθύνουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειες μας, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Θάνος Νικόλαος & Τσίντσιφας Λυσίμαχος

## Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗ ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ

### Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε εργαστηριακή δεξαμενή σύνθετης διατομής (τραπεζοειδούς στο κατώτερο τμήμα και ορθογωνική στο ανώτερο), με σκοπό την μελέτη της επίδρασης της βλάστησης στην κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας με μεγάλη αλατότητα. Η μέτρηση καταγράφηκε με ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας ενώ καταγράφεται και η εμπρόσθια ταχύτητα που διαδίδεται το ρευστό.

Το κανάλι (δεξαμενή) διαχωρίζεται με μια κατακόρυφη θυρίδα σε δύο ρεζερβουάρ, στο ένα ρεζερβουάρ υπάρχει το καθαρό νερό ( $w$ ) μαζί με την βλάστηση, ενώ στο άλλο ρεζερβουάρ υπάρχει το αλατόνερο ( $sw$ ). Με το άνοιγμα της θυρίδας προκαλείται ροή λόγω της διαφοράς πυκνότητας. Το πυκνότερο υγρό κινείται στον πυθμένα κατά μήκος της βλάστησης, ενώ αντίστοιχα το ελαφρύτερο στην ελεύθερη επιφάνεια. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορές πυκνότητας της τάξεως  $1050\text{kg/m}^3, 1060\text{kg/m}^3, 1070\text{kg/m}^3, 1080\text{kg/m}^3, 1090\text{kg/m}^3$ , από αρχικές στάθμες καθαρού νερού και αλατόνερου  $H_0=5\text{cm}, H_0=10\text{cm}, H_0=17.5\text{cm}, H_0=25\text{cm}$ .

Η μελέτη των συγκεκριμένων διαφορών πυκνότητας προσομοιώνει και αναπαριστά την διάδοση υγρών αποβλήτων των οποίων η διάδοση συνιστούν σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Η απελευθέρωση ρύπων σε ποτάμια και υδροβιότοπους, η εξάπλωση μια κηλίδας πετρελαίου στον ωκεανό είναι παραδείγματα ανθρωπογενών ρευμάτων βαρύτητας που προκαλούν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίθηκαν με αυτά άλλων ερευνητών που πραγματοποίησαν παρόμοια πειράματα (Shin et al. (2004), Monaghan et al.(2009) και Κεραμάρης και Πρίνος (2016)) με μικρότερους λόγους πυκνοτήτων. Από τις συγκρίσεις των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι τα ρεύματα βαρύτητας με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας κινούνται ταχύτερα. Το σχήμα της λεκάνης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας. Η ύπαρξη τραπεζοειδούς διατομής αυξάνει την ταχύτητα των ρευμάτων βαρύτητας σε σύγκριση με την τριγωνική και ορθογωνική διατομή. Η αύξηση του αρχικού υψομέτρου  $H_0$  (καθαρού νερού και αλατόνερου) δημιουργεί ρεύματα βαρύτητας με μεγαλύτερη ταχύτητα.

### Abstract

In this thesis experiments in a laboratory tank were performed. The shape of the tank was trapezoidal at the bottom and rectangular at the top. The purpose of this work is to observe the effects of vegetation on the movement of gravity currents between clean and salt water with high salinity. The experiments were recorded with high resolution digital video which also recorded the front velocity of the high salinity water.

The tank was separated with a vertical gate valve into two reservoirs. One of the reservoirs was filled with clean water (w) and vegetation at the bottom. The second reservoir was filled with various saline water mixtures (sw). After opening the valve there is flow due to the different densities of the two fluids. The denser saline water moves towards the bottom and along the vegetation when the less dense clean water moves towards the free surface. The experiments were performed with saline water densities of  $1050\text{kg/m}^3$ ,  $1060\text{ kg/m}^3$ ,  $1070\text{ kg/m}^3$ ,  $1080\text{ kg/m}^3$  and  $1090\text{kg/m}^3$  for initial water heights of ( $H_0$ ) at 5cm, 10 cm, 17.5cm, and 25cm.

These values of densities simulates and represents the spread of liquid waste which is a very important environmental concern. The release of pollutants into rivers and wetlands, the spread of an oil spill into the ocean are examples of gravity currents that have detrimental environmental consequences.

The results of the experiments were compared to the results of other researchers in similar experiments (Shin et al. (2004), Monaghan et al.(2009) and Keramaris, Prinos (2016)) with smaller density ratios. The comparison of the results showed that gravity currents with the largest density difference move faster. The shape of the valley plays a very important role on the gravity currents velocity. The presense of trapezoidal shape increases the velocity of the gravity currents in comparison to the triangular and rectangular shapes. The increase of the

initial height  $H_0$  (for clean and high salinity water) also produces higher velocity gravity currents.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....</b>	<b>11</b>
1.1 Δομή ρεύματος βαρύτητας .....	11
1.2 Σκοπός και υπόβαθρο μελέτης των ρευμάτων βαρύτητας.....	12
1.3 Ρεύματα βαρύτητας στην φύση .....	13
<b>Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική αναφορά.....</b>	<b>15</b>
<b>Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη.....</b>	<b>23</b>
3.1 Αναλυτική περιγραφή της κατασκευής.....	23
3.2 Παρασκευή απαιτούμενης αλατότητας .....	24
3.3 Εκτέλεση πειραμάτων.....	25
<b>Κεφάλαιο 4 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....</b>	<b>28</b>
4.1 Σύγκριση πειραμάτων στην τραπεζοειδή διατομή.....	28
4.2 Σύγκριση ρευμάτων βαρύτητας στην σύνθετη διατομή .....	34
4.3 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα σύνθετης και τραπεζοειδούς διατομής .....	43
<b>Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....</b>	<b>51</b>
<b>Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία .....</b>	<b>54</b>
<b>Κεφάλαιο 7 Παράρτημα.....</b>	<b>57</b>



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.2.1 Πίνακας πυκνοτήτων που επιτεύχθηκαν στην πειραματική διάταξη.....	25
Πίνακας 4.1.2 Αποτελέσματα χρονικής εξέλιξης του ρεύματος για το αρχικό υψόμετρο $H_0=5\text{cm}$ για τις διάφορες πυκνότητες.....	29
Πίνακας 4.1.4 Αποτελέσματα χρονικής εξέλιξης του ρεύματος για το αρχικό υψόμετρο $H_0=10\text{cm}$ για τις διάφορες πυκνότητες.....	31
Πίνακας 4.2.2 Δεδομένα χρονικής εξέλιξης με αρχικό ύψος $H_0=17.5\text{cm}$ για τις διάφορες πυκνότητες.....	36
Πίνακας 4.2.4 Δεδομένα χρονικής εξέλιξης με αρχικό ύψος $H_0=25\text{cm}$ για τις διάφορες πυκνότητες.....	38

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 4.1.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος τραπεζοειδούς διατομής με $H_0=5\text{cm}$ .....	29
Σχήμα 4.1.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου για αρχικό υψόμετρο $H_0=10\text{cm}$ .....	30
Σχήμα 4.1.5 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{ kg/m}^3$ για αρχικά υψόμετρα $H_0=5\text{cm}$ και $H_0=10\text{ cm}$ .....	32
Σχήμα 4.1.6 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{ kg/m}^3$ για αρχικά υψόμετρα $H_0=5\text{cm}$ και $H_0=10\text{ cm}$ .....	32
Σχήμα 4.1.7 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{ kg/m}^3$ για αρχικά υψόμετρα $H_0=5\text{cm}$ και $H_0=10\text{ cm}$ .....	33
Σχήμα 4.1.8 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{ kg/m}^3$ για αρχικά υψόμετρα $H_0=5\text{cm}$ και $H_0=10\text{ cm}$ .....	33
Σχήμα 4.1.9 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{ kg/m}^3$ για αρχικά υψόμετρα $H_0=5\text{cm}$ και $H_0=10\text{ cm}$ .....	34
Σχήμα 4.2.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος σύνθετης διατομής με $H_0=17.5\text{cm}$ .....	35
Σχήμα 4.2.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος σύνθετης διατομής με $H_0=25\text{cm}$ .....	37
Σχήμα 4.2.5 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ για $H_0=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$ .....	39
Σχήμα 4.2.6 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ για $H_0=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$ .....	39

Σχήμα 4.2.7 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ για $H_0=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$ .....	40
Σχήμα 4.2.8 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ για $H_0=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$ .....	40
Σχήμα 4.2.9 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ για $H_0=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$ .....	41
Σχήμα 4.2.10 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας στην τραπεζοειδή διατομή $H_0=5\text{cm}, H_0=10\text{cm}$ .....	41
<b>Σχήμα 4.2.11</b> Χρονική εξέλιξη μετώπου ρεύματος βαρύτητας στην σύνθετη διατομή $H_0=17.5\text{cm}, H_0=25\text{cm}$ .....	42
Σχήμα 4.3.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με $H_0=5\text{cm}$ .....	44
Σχήμα 4.3.2 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με $H_0=10\text{cm}$ .....	45
Σχήμα 4.3.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με $H_0=17.5\text{cm}$ .....	46
Σχήμα 4.3.4 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με $H_0=25\text{cm}$ .....	47
Σχήμα 4.3.5 Συγκριτικό διάγραμμα χρονικής εξέλιξης του μετώπου σε αδιάστατη μορφή.....	48
Σχήμα 4.3.6 Συγκριτικό διάγραμμα χρονικής εξέλιξης του μετώπου σε αδιάστατη μορφή .....	50

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1.1 Δεξαμενή από plexiglass. Στον πυθμένα υπάρχει βλάστηση 2cm.....	24
Εικόνα 3.3.1 Στιγμιότυπα εξέλιξης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	27
Εικόνα 7.1 Δεξαμενή από plexiglass 205 εκ. σε μήκος, πλάτους 23εκ. στο άνω και 5εκ. στο κατώτερο .....	57
Εικόνα 7.2 Προφίλ δεξαμενής με βλάστηση, όπου διαχωρίζεται με θυρόφραγμα σε δύο ρεζερβουάρ.....	57
Εικόνα 7.3 Προφίλ εξόδου δεξαμενής με βλάστηση.....	58
Εικόνα 7.4 Προφίλ δεξαμενής από plexiglass μήκους 205cm.....	58
Εικόνα 7.5 Θυρόφραγμα ύψους 25cm της σύνθετης διατομής.....	58
Εικόνα 7.6 Δοκιμαστικός σωλήνας όπου έγινε η επίτευξη των πυκνοτήτων.....	59
Εικόνα 7.7 Ροδαμίνη υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση των ρευμάτων.....	59
Εικόνα 7.8 Προετοιμασία εκτέλεσης πειράματος $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	59
Εικόνα 7.9 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{Kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	60
Εικόνα 7.10 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	60
Εικόνα 7.11 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	60
Εικόνα 7.12 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{Kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	61
Εικόνα 7.13 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	61
Εικόνα 7.14 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	61

Εικόνα 7.15 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	62
Εικόνα 7.16 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	62
Εικόνα 7.17 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{Kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	62
Εικόνα 7.18 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	63
Εικόνα 7.19 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{Kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	63
Εικόνα 7.20 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{Kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	63
Εικόνα 7.21 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	64
Εικόνα 7.22 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	64
Εικόνα 7.23 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ $H_0=5\text{cm}$ .....	64
Εικόνα 7.24 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	65
Εικόνα 7.25 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	65
Εικόνα 7.26 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	65
Εικόνα 7.27 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	66
Εικόνα 7.28 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	66
Εικόνα 7.29 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	66
Εικόνα 7.30 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	67
Εικόνα 7.31 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{Kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	67
Εικόνα 7.32 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	67
Εικόνα 7.33 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	68
Εικόνα 7.34 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	68

Εικόνα 7.35 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	68
Εικόνα 7.36 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{Kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	69
Εικόνα 7.37 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	69
Εικόνα 7.38 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{Kg/m}^3$ $H_0=10\text{cm}$ .....	69
Εικόνα 7.39 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	70
Εικόνα 7.40 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	70
Εικόνα 7.41 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	70
Εικόνα 7.42 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	71
Εικόνα 7.43 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{Kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	71
Εικόνα 7.44 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	71
Εικόνα 7.45 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{Kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	72
Εικόνα 7.46 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{Kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	72
Εικόνα 7.47 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	72
Εικόνα 7.48 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	73
Εικόνα 7.49 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{Kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	73
Εικόνα 7.50 τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	74
Εικόνα 7.51 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{Kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	74
Εικόνα 7.52 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	74
Εικόνα 7.53 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{Kg/m}^3$ $H_0=17.5\text{cm}$ .....	75
Εικόνα 7.54 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	75

Εικόνα 7.55 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	75
Εικόνα 7.56 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	75
Εικόνα 7.57 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	76
Εικόνα 7.58 Μέση κίνηση ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	76
Εικόνα 7.59 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	76
Εικόνα 7.60 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	77
Εικόνα 7.61 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	77
Εικόνα 7.62 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	77
Εικόνα 7.63 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	78
Εικόνα 7.64 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	78
Εικόνα 7.65 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	78
Εικόνα 7.66 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	79
Εικόνα 7.67 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	79
Εικόνα 7.68 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ $H_0=25\text{cm}$ .....	79

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται εισαγωγικές πληροφορίες σχετικά με την δομή και το υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης περιγράφονται οι ενότητες που την απαρτίζουν.

### 1.1 Δομή ρεύματος βαρύτητας

Τα ρεύματα βαρύτητας ή ρεύματα πυκνότητας είναι ροές που εμφανίζονται τόσο σε φυσικές όσο και ανθρωπογενείς καταστάσεις. Ως ρεύμα βαρύτητας ή ρεύμα πυκνότητας ορίζεται η ροή ενός ρευστού εντός ενός άλλου, που προκαλείται από την διαφορά πυκνότητας μεταξύ των ρευστών. Τα ρεύματα βαρύτητας μπορούν να εμφανιστούν και σε υγρά και σε αέρια που βρίσκονται είτε σε κατάσταση ηρεμίας είτε σε κίνηση. Εκδηλώνονται συνήθως ως οριζόντιες ροές ενώ μπορούν να δημιουργηθούν ακόμη και από μια διαφορά πυκνότητας ελάχιστου ποσοστού. Τα ρεύματα βαρύτητας δημιουργούνται είτε από πεπερασμένη είτε από συνεχή απελευθέρωση ρευστού και αποτελούνται από δύο μέρη, μια κεφαλή (head) και ένα σώμα (body). Η κεφαλή, είναι η αιχμή του ρεύματος βαρύτητας και εκεί μετατοπίζονται οι - μεγαλύτεροι όγκοι, ενώ το σώμα είναι ο όγκος ροής που την ακολουθεί. Η κεφαλή του ρεύματος βαρύτητας συνήθως βρίσκεται χαμηλότερα υψομετρικά από την ακόλουθη ροή. Παρότι η δομή τους μπορεί να περιγραφεί με μεγάλη λεπτομέρεια, δεν είναι δυνατόν να οριστεί ένα καθολικό προφίλ, καθώς είναι ιδιαίτερα περίπλοκο και εξαρτάται από πολλούς φυσικούς παράγοντες (Simpson 1982). Η μετωπική ζώνη χαρακτηρίζεται από μια τρισδιάστατη



ακανόνιστη ροή που δημιουργείται από διατμητικές και βαρυτικές αστάθειες, κυματισμούς Kelvin-Helmholtz και από ένα πολύπλοκο μοτίβο μετατοπίσεως λοβών και σχισμών (Shimpson 1969,1972). Οι κυματισμοί δημιουργούνται στην διεπιφάνεια, στο πίσω μέρος του μετώπου, παραμένουν σταθεροί και εξασθενούν λόγω της συνεχούς ανάμιξης με το περιβάλλον υγρό. Οι σχισμές και οι λοβοί δημιουργούνται από την περιβαλλοντική αστάθεια του λιγότερου πυκνού υγρού που υπερχειλίζεται από το μέτωπο του ρεύματος βαρύτητας, το οποίο διαδίδεται κατά μήκος ενός ορίου χωρίς ολίσθηση. Οι κυματισμοί Kelvin-Helmholtz που εμφανίζονται είναι στροβιλισμοί υγρού που δημιουργούνται κατά την επαφή του ρεύματος βαρύτητας με το περιβάλλον υγρό. Αυτοί παραμένουν σταθεροί στην δομή του ρεύματος βαρύτητας, όμως εξασθενεί λόγω της συνεχούς συσσώρευσης του περιβάλλοντος υγρού.

Το προφίλ του μετώπου ενός ρεύματος βαρύτητας καθώς και ο ρυθμός διάδοσής του είναι πολύ ευαίσθητα σε οποιαδήποτε αντίθετη ή επακόλουθη ροή στο περιβάλλον. Τα ρεύματα βαρύτητας επηρεάζονται από το ανάγλυφο της επιφάνειας στην οποία ρέουν, την εισχώρηση του περιβάλλοντος υγρού και σε πολλές περιπτώσεις και στα σωματίδια που μεταφέρουν.

## **1.2 Σκοπός και υπόβαθρο μελέτης των ρευμάτων βαρύτητας**

Τα ρεύματα βαρύτητας δημιουργούνται σε πολλές διαφορετικές φυσικές καταστάσεις, ή ως αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας. Η γνώση των φυσικών τους ιδιοτήτων, δηλαδή πως αναπτύσσονται στον χώρο, είναι ιδιαίτερα σημαντική σε πολλά επιστημονικά πεδία. Τα ρεύματα βαρύτητας εμφανίζονται στο περιβάλλον, όπως στην ατμόσφαιρα, στους ωκεανούς και σε πολλά φυσικά φαινόμενα. Εμφανίζονται επίσης στο περιβάλλον εξαιτίας πολλών ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως θα αναλυθεί εκτενώς στο επόμενο υποκεφάλαιο. Πληθώρα ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, που έχουν ως αποτέλεσμα την ατμοσφαιρική

ρύπανση και τη μόλυνση των υδάτων, έχουν ως αναγκαία αρχική συνθήκη την διάδοση ενός ρεύματος βαρύτητας.

### 1.3 Ρεύματα βαρύτητας στην φύση

Στην ατμόσφαιρα οι εκροές καταιγίδων και τα μέτωπα θαλάσσιας αύρας, είναι ρεύματα πυκνότητας πυκνού και κρύου αέρα. Παράδειγμα ατμοσφαιρικών ρευμάτων πυκνότητας είναι οι χιονοστιβάδες, με αερομεταφερόμενα σωματίδια χιονιού.

Τα ρεύματα πυκνότητας έχουν σημαντική εφαρμογή στην ασφάλεια των πτήσεων, στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στην βιομηχανική παραγωγή, όπου έχουν συμβεί εργοστασιακά ατυχήματα λόγω τυχαίας απελευθέρωσης πυκνών αερίων. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες τόσο σε θεωρητικό, όσο και πειραματικό στάδιο που αντικείμενο μελέτης την αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων.

Στον ωκεανό δημιουργούνται τα ρεύματα βαρύτητας από διαφορά αλατότητας ή λόγω θερμοκρασιακής ανομοιογένειας. Τα συγκεκριμένα ρεύματα βαρύτητας δεν είναι τόσο εύκολα ευδιάκριτα σε κάποιον παρατηρητή, αλλά σειρές από αφρό και θαλάσσια υπολείμματα στην επιφάνεια αποδεικνύουν την παρουσία τους.

Οι πετρελαιοκηλίδες είναι ένα σημαντικό παράδειγμα ανθρωπογενούς δραστηριότητας, που οδηγεί σε ρύπανση των υδάτων. Μια διαρροή πετρελαίου από δεξαμενόπλοιο ή μια αστοχία σε μια εξέδρα εξόρυξης πετρελαίου, οδηγεί στην δημιουργία ενός ρεύματος βαρύτητας από ρευστό μικρότερης πυκνότητας, σε ρευστό μεγαλύτερης πυκνότητας στην επιφάνεια. Είναι σημαντικό να γίνει εγκαίρως αντιληπτή και να ληφθούν αρχικά τα μέτρα για τον περιορισμό της μόλυνσης και στην συνέχεια για την εξάλειψή της.

Η απόθεση υγρών αποβλήτων σε υγροβιότοπους από βιομηχανικές, κτηνοτροφικές και γεωργικές δραστηριότητες, είναι πολύ σύνηθες φαινόμενο. Ο ρύπος που απελευθερώνεται, αναμιγνύεται με το νερό διαφορετικής πυκνότητας και δημιουργείται ένα οριζόντιο ρεύμα βαρύτητας, από ρευστό μεγαλύτερης πυκνότητας σε ρευστό μικρότερης. Η παραπάνω δραστηριότητα μάλιστα οδηγεί και στην δημιουργία πρόσθετων προβλημάτων στον υγροβιότοπο, όπως ευτροφισμός.

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική αναφορά

Αρχικά, μελετήθηκαν οι αλληλοεπιδράσεις ροών σε άμμο από τον G.H. Keulegan(1954), οι οποίες επηρεάζονταν κυρίως από την οπισθέλκουσα δύναμη και το επίπεδο επαφής είναι ένα κεκλιμένο προς τον οριζόντιο επίπεδο, που στρέφεται γύρο από το μεσοδιάστημα του.

Οι Oldham και Starham (2001) μελέτησαν την επιρροή πυκνής βλάστησης στην ταχύτητα του ρεύματος. Το πειραματικό μοντέλο που μελέτησαν, αναφερόταν σε ροές πυκνής βλάστησης με χαμηλούς αριθμούς Reynolds, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σύνηθες σε ανοιχτούς αγωγούς στην φύση με πυκνή βλάστηση, όπως οι υγρότοποι. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν είναι ότι η ταχύτητα του ρεύματος μειώνεται στην περιοχή όπου υπάρχει αυξημένη βλάστηση.

Οι J.O. Shin et.al.(2004) έκαναν ένα πείραμα αλληλεπίδρασης ροών μέσω θυροφράγματος, για να ερευνήσουν την εξάπλωση βαρυτικών κυμάτων. Τοποθέτησαν τυχαία σταθερούς κυλίνδρους οι οποίοι προσομοιάζουν ένα σύμπλεγμα υδρόβιων φυτών. Όσο η αντίσταση αυξάνει το μέτωπο εξάπλωσης, διαφέρει από το κλασικό προφίλ ενός ανεμπόδιστου βαρυτικού κύματος σε ένα τριγωνικό προφίλ. Αντίθετα με την ανεμπόδιστη αλληλεπίδραση ροής μέσω θυροφράγματος, το βαρυτικό κύμα στην περίπτωση με τους τυχαίους σταθερούς κυλίνδρους επιβραδύνεται με τον χρόνο όσο το μέτωπο επιμηκύνεται. Διαπιστώθηκαν επίσης δυο περιπτώσεις κυρίαρχης αντίστασης για γραμμικούς και μη γραμμικούς νόμους. Ο θεωρητικός τύπος για την ταχύτητα στον πυθμένα υποστηρίχθηκε από τις τιμές που παρατηρήθηκαν. Εμπειρικά κριτήρια δημιουργήθηκαν για να προβλέψουν τον τύπο του κύματος από τον αριθμό Reynolds των κυλίνδρων και την πυκνότητα τους. Παρουσιάστηκε ένας πίνακας για την κατανόηση των τύπων ροών, που δημιουργούνται από την παρουσία

βλάστησης και μια ενδοσκόπηση σε τρόπους με τους οποίους υδροδυναμικά αποτελέσματα λόγω σταθερής βλάστησης, μπορεί να ενσωματωθούν σε αριθμητικά μοντέλα κυκλοφοριακής συναγωγής.

Οι Antenucci et al. (2005) μελέτησαν μία σταθερή ροή κατά μήκος καναλιού διατομής σχήματος V σε μία δεξαμενή για να μοντελοποιήσουν τη διασπορά παθογόνων παραγόντων. Ρεύματα σταθερής ροής κατά μήκος ελικοειδών καναλιών έχουν ερευνηθεί με τη χρήση ρευμάτων με αλατόνερο για τη προσομοίωση ρευμάτων θολότητας (Keevil et al., 2006).

Οι Tanino et al. (2005) μελέτησαν το προφίλ του ρεύματος βαρύτητας σε αγωγούς με παρουσία υδρόβιας βλάστησης. Πραγματοποίησαν πειράματα με χρήση άκαμπτων βυθισμένων κυλίνδρων, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τα υδρόβια φυτά. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το προφίλ του μετώπου του ρεύματος βαρύτητας διαφέρει σημαντικά σε σχέση με εκείνο του ρεύματος σε πυθμένα χωρίς την παρουσία βλάστησης, ενώ η ταχύτητα του ρεύματος βαρύτητας επιβραδύνεται με την πάροδο του χρόνου.

Οι Takagi και Huppert (2007) εξέτασαν Νευτώνια ρεύματα βαρύτητας με ιξώδες κατά μήκος οριζόντιων και κεκλιμένων καναλιών σχήματος ημικυκλικού και σχήματος V. Στην συνέχεια συνέκριναν τα πειραματικά αποτελέσματα με μαθηματικά μοντέλα. Γεωλογικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων ακόμη ερευνώνται.

Επίσης οι Takagi και Huppert (2008) έκαναν χρήση ενός μοντέλου ακανόνιστης ροής Stokes σε άκαμπτες επιφάνειες για να αποκτήσουν μια ποικιλία διαφορετικών ποσοστών διάδοσης από ρεύματα βαρύτητας με ιξώδες, τα οποία δημιουργούνται θεωρώντας διαφορετικές στιγμές έναρξης στην πηγή μέσα στο κανάλι που αλλάζει σχήμα κατά μήκος της ροής. Ακόμη η θέση του ρεύματος μέσα είτε σε ένα εξαιρετικά στενό είτε ένα κανάλι σχήματος

$V$ , το οποίο διευρύνεται ομαλά κατά μήκος της ροής, μελετάται και φαίνεται να είναι ανάλογη με την ισχύ του χρόνου.

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες σε μοντέλα ρευμάτων βαρύτητας σε δεξαμενή ορθογώνιας διατομής στο πυθμένα της οποίας υπάρχει βλάστηση καθώς η τελευταία είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι Zhang και Nepf (2008) διερεύνησαν μια ανταλλαγή ροής μεταξύ περιοχών με βλάστηση και άνευ βλάστησης σε επιφανειακά ύδατα με διαφορές στην πυκνότητα του νερού. Η περιοχή με την βλάστηση έχει την μεγαλύτερη πυκνότητα. Η βλάστηση προσομοιώθηκε με τυχαία σειρά άκαμπτων μη βυθιζόμενων κυλίνδρων. Το συμπέρασμα που προέκυψε από την έρευνα αυτή είναι ότι το ρεύμα βαρύτητας στην περιοχή όπου δεν υπάρχει βλάστηση κινείται σε όλο το μήκος με σταθερή ταχύτητα που προέκυψε από την αρχική αδρανειακή κατάσταση, ενώ αντίθετα στην περιοχή που υπάρχει βλάστηση η ταχύτητα καθορίζεται από την αντίσταση των κυλίνδρων και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2008) πραγματοποίησαν πειράματα σε δεξαμενή με προκαθορισμένα όρια στην οποία ο πυθμένας καλύπτεται από υλικό τύπου γρασιδιού διαφορετικής αναλογίας βύθισης με πυκνότητες που κυμαίνονται από 0.08 έως 0.30. Ερευνήθηκαν οι επιδράσεις του λόγου πυκνότητας, του λόγου βύθισης και της κλίσης του πυθμένα στην κίνηση του ρεύματος. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι ο λόγος  $h_v/H$  ( $h_v$ =ύψος βλάστησης,  $H$ =ύψος νερού) είναι σημαντικός παράγοντας στην μετάδοση του ρεύματος βαρύτητας, η επίδραση της βλάστησης δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική κοντά στην περιοχή του θυροφράγματος, ενώ η ταχύτητα του ρεύματος μειώνεται με την πάροδο του χρόνου μέχρι το πέρας της δεξαμενής.

Περιορισμένος αριθμός μελετών έχει πραγματοποιηθεί για ρεύματα βαρύτητας σε λεκάνη. Οι Monaghan et al. (2009a) διερεύνησαν την κίνηση ρευμάτων με αλατόνερο που

διαδίδονται οριζόντια σε δεξαμενή ορθογώνιας διατομής στο ανώτερο και διατομής σχήματος V στο κατώτερο τμήμα της με πειράματα ανταλλαγής ροής και ένα μοντέλο προσομοίωσης. Η ύπαρξη λεκάνης έχει ως αποτέλεσμα το μέτωπο του ρεύματος βαρύτητας να είναι κατά προσέγγιση παραβολικό, για επαρκώς μεγάλη διάρκεια χρόνου η ταχύτητα στην διατομή σχήματος V διαφέρει από αυτή στην επίπεδη βάση, ενώ το πλάτος του ρεύματος βαρύτητας στην διατομή V μειώνεται με τον χρόνο. Παράλληλα ανέπτυξαν μοντέλο προσομοίωσης για την επίπτωση της αλλαγής κλίσης στην λεκάνη, για ρεύματα ίσου όγκου και το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι όσο πιο απότομη είναι η κλίση ης λεκάνης τόσο πιο γρήγορη είναι η ροή.

Επίσης οι Monaghan et al. (2009b) στο επιστημονικό τους άρθρο επέκτειναν προηγούμενες μελέτες από ρεύματα βαρύτητας με αλατόνερο σε με υψηλούς αριθμούς Reynolds τα οποία ρέουν κατά μήκος δεξαμενής με λεκάνη σε σχήμα V. Χρησιμοποίησαν πειράματα και ένα model-box (απλούστερη προσέγγιση μοντελοποίησης ενός ρεύματος βαρύτητας πεπερασμένου όγκου) ώστε να εξακριβώσουν τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής. Το μέτωπο της ροής είναι κατά προσέγγιση παραβολικό. Τα αποτελέσματα μπορούν να περιγραφούν με αξιοσημείωτη ακρίβεια μέσω του model-box χρησιμοποιώντας μία γενίκευση της εξίσωσης για καθίζησης του ιζήματος από ένα τυρβώδες μέσο.

Οι Κεραμάρης κ.ά. (2009) πραγματοποίησαν πειράματα σε ανοιχτή δεξαμενή για την επίδραση της βλάστησης στην κίνηση διδιάστατων ρευμάτων βαρύτητας, όπου η βλάστηση προσομοιώθηκε με συστοιχία ράβδων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή με μετακινούμενη θυρίδα που διαχώριζε το αλατισμένο νερό από το καθαρό, με διαφορά πυκνότητας  $\Delta\rho=0,1\%$ ,  $\Delta\rho=0,2\%$  και  $\Delta\rho=0,3\%$ . Με το άνοιγμα της θυρίδας το δημιουργούμενο ρεύμα βαρύτητας καταγράφηκε με κάμερα υψηλής ευκρίνειας προκειμένου να καταγραφούν η διανυθείσα απόσταση, το ύψος του μετώπου και η ταχύτητα του μετώπου για τις ράβδους πάνω

από την επιφάνεια του νερού (μη βυθισμένη βλάστηση) και για ράβδους κάτω από την επιφάνεια του νερού (βυθισμένη βλάστηση). Υπάρχει διαφορά των χαρακτηριστικών του ρεύματος στην περιοχή όπου υπάρχει βλάστηση, σε σχέση με τις περιοχές όπου δεν υπάρχει βλάστηση. Η αύξηση του λόγου  $h_{veg}/h$  ( $h_{veg}$ =ύψος βλάστησης,  $h$ =ύψος νερού) προκαλεί αύξηση του χρόνου εξέλιξης του ρεύματος, ενώ η σύγκριση που έγινε τα αποτελέσματα της έρευνας των Shin et al. (2004) η ταχύτητα του μετώπου είναι μικρότερη για πυθμένα με βλάστηση.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2009) μελέτησαν την επίδραση της αντίστασης, λόγω βλάστησης σε ρεύματα βαρύτητας μέσω πειραμάτων σε δεξαμενή με θυρίδα. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ αλατόνευρου και διαλυτού νερού κυμάνθηκε μεταξύ του 0.1% και 0.3%. Η βλάστηση προσημειώθηκε με συστοιχία εύκαμπτων βυθιζόμενων ράβδων (βυθιζόμενη βλάστηση) με δύο διαφορετικές αναλογίες 1440 ράβδοι/μέτρο και 2850 ράβδοι/μέτρο. Η κίνηση του ρεύματος βαρύτητας παρακολουθήθηκε με ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας, μετρήθηκε η εμπρόσθια ταχύτητα και καταγράφηκε το ύψος του εμπρόσθιου τμήματος. Τα χαρακτηριστικά του ρεύματος βαρύτητας σε πυθμένα με βλάστηση είναι ποιοτικά διαφορετικά σε σχέση με επιφάνεια με λεία επιφάνεια και αναδυόμενη βλάστηση, η αύξηση του λόγου  $H/h_{veg}$  ( $H$ =ύψος νερού,  $h_{veg}$ =ύψος βλάστησης) προκαλεί αύξηση της ταχύτητας λόγω της μικρής αντίστασης των ράβδων.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2010) διερεύνησαν την κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας αλατόνευρου με διαφορά πυκνότητας σε σύνθετη διατομή, κάτω τραπεζοειδή και άνω ορθογωνική, μια λεκάνη η οποία συναντάται στην φύση. Τα πειράματα εκτελούνταν για ίδια στάθμη καθαρού νερού και αλατόνευρου μεταξύ του θυροφράγματος. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ καθαρού νερού και αλατόνευρου κυμάνθηκε από 0,1% έως 0,4% και μελετήθηκε το μέτωπο του ρεύματος, και η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος βαρύτητας.-



Το πρόβλημα της θερμικής μεταφοράς σε ένα υγρό μέσω ενός πορώδους μέσου μελετήθηκε από τον Kumar (2012) ώστε να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις του κατακόρυφου μαγνητικού πεδίου και της κάθετης περιστροφής. Ο Banyal (2013) διερεύνησε την θερμική αστάθεια ενός ρευστού το οποίο θερμαίνεται για να αντλήσει έτσι την απαραίτητη συνθήκη για την έναρξη της αστάθειας ως στατική μεταφορά.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2016) πραγματοποίησαν πειράματα σε εργαστηριακή διατομή με παρουσία βλάστησης για την διερεύνηση της επίδρασης της διατομής στην κίνηση του ρεύματος βαρύτητας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για τραπεζοειδή διατομή και για σύνθετη διατομή (άνω ορθογώνια και κάτω τραπεζοειδής). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η γεωμετρία της λεκάνης επηρεάζει σημαντικά την κίνηση του ρεύματος βαρύτητας, το ρεύμα με το μεγαλύτερο αρχικό υψόμετρο  $H$  κινείται ταχύτερα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίθηκαν με την έρευνα των Κεραμάρης και Πρίνος (2010) για δεξαμενή ίδιου τύπου χωρίς την παρουσία βλάστησης, όπου εκεί τα ρεύματα βαρύτητας κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Επίσης τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά των Monaghan et al. (2009a, 2009b) και παρατηρήθηκε ικανοποιητική συμφωνία των αποτελεσμάτων.

Ο Κεραμάρης (2017) μελέτησε την επίδραση ενός πορώδους υλικών (εύκαμπτου και άκαμπτου) στον πυθμένα εργαστηριακής δεξαμενής σχετικά με την κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας. Το διαπερατό υλικό στον πυθμένα προσομοιώνεται με γρασίδι στην περίπτωση του εύκαμπτου υλικού και στη συνέχεια με δέσμες ράβδων για την προσομοίωση του άκαμπτου υλικού και πραγματοποιήθηκαν πειράματα για ίσα ύψη βλάστησης και διαφορές πυκνότητας της τάξεως του 2%, 4% και 6%. Τα ρεύματα βαρύτητας κινούνται ταχύτερα σε πυθμένα με εύκαμπτη βλάστηση σε σύγκριση με την παρουσία άκαμπτης βλάστησης, η αύξηση του αδιάστατου συντελεστή  $H_v/H$  ( $H_v$ =ύψος βλάστησης,  $H$ =ύψος νερού) έχει ως αποτέλεσμα την

μείωση του χρόνου που απαιτείται από το ρεύμα για να καλύψει την απόσταση, η ταχύτητα του μετώπου είναι μικρότερη σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των Shin et al. (2004) για πυθμένα χωρίς βλάστηση.

Οι Zhao et al.(2018) παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο σύνολο αναλυτικών τύπων για τον καθορισμό της ταχύτητας και της θέσης μετώπου ενός βαρυτικού κύματος με κλίση σε ένα γραμμικά στρωματοποιημένο περιβάλλον με θυρόφραγμα. Οι τύποι αναπτύχθηκαν βασισμένοι στην θεωρία της διατήρησης της μάζας και στις εξισώσεις ορμής, βασισμένες στην θεωρία της θερμότητας, με περεταίρω θεώρηση της κάθετης γραμμικής στρωματοποίησης του νερού περιβάλλοντος. Τα πειράματα έδειξαν ότι η δημιουργία ενός βαρυτικού κύματος μπορεί να διαχωριστεί σε μια μικρή φάση επιτάχυνσης και κατόπιν σε μια φάση επιβράδυνσης όσο αναφορά την ταχύτητα μετώπου πριν αφήσει το κεκλιμένο επίπεδο. Δυο συντελεστές που αφορούν την γεωμετρία του πειράματος περιλαμβάνονται στους τύπους, ένας για την φάση επιτάχυνσης και ένας για την φάση της επιβράδυνσης. Η κάθε αντιστοιχία μεταξύ των πειραματικών στοιχείων και των τύπων επιβεβαιώνουν την δυνατότητα των προτεινόμενων τύπων να περιγράψουν την εξελικτική διαδικασία των βαρυτικών κυμάτων με θυρόφραγμα σε κλίση σε γραμμικά στρωματοποιημένα περιβάλλοντα . Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται κυρίως στην δημιουργία βαρυτικών κυμάτων σε κλίση χωρίς σωματίδια σε γραμμικά στρωματοποιημένα περιβάλλοντα. Η εφαρμογή της παρούσας θεωρίας σε συγκεκριμένα βαρυτικά κύματα χρειάζεται περισσότερη πειραματική και θεωρητική ερευνά στο μέλλον.

Οι Xiaoling Yin et. (2019) πραγματοποίησαν πειράματα που έλαβαν χώρα σε ένα κανάλι μήκους 80m με την χρήση καθαρού και αλατισμένου νερού, ώστε να δημιουργηθούν βαρυτικά κύματα με μεγάλο αριθμό Reynolds. Μια υδραυλική θεωρία ενός στρώματος διαμορφώθηκε ώστε να εκφράσει τα κύματα για όλη την διαδικασία. Χωρίς ανακλαστικά κύματα και χωρίς μείωση μετώπου στο πίσω μέρος , τα μέτωπα των κυμάτων

διαχύθηκαν αργά και ομαλά. Οι αδιάστατες ταχύτητες κάθε δοκιμής στην αρχή είναι στην περιοχή του 0,41-0,48 m/s το οποίο πλησιάζει τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών. Εντούτοις, χωρίς καμία παρατηρημένη μετάβαση κατά την διάρκεια όλης της διαδικασίας ,οι ταχύτητες μετώπου σταδιακά ελαττώνονται λόγω στην επίδραση της οπισθέλκουσας δύναμης και της τριβής. Βασισμένη στις παραδοχές και μειώσεις που έγιναν, το μήκος της διάδοσης, της ταχύτητας του μετώπου και το ύψος του μετώπου υπολογίστηκαν θεωρητικά. Το μήκος της εξάπλωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο απεικονίζεται με μια παραβολική συνάρτηση .Η ταχύτητα του μετώπου δείχνει μια γραμμική μείωση σε συνάρτηση με τον χρόνο στην βάση μιας αρχικής ταχύτητας. Η επαλήθευση είναι ικανοποιητική και οι παρουσιασμένες σχέσεις έρχονται σε συμφωνία με τα πειραματικά στοιχεία από τους προηγούμενους νόμους. Πάνω από όλα ,καλύπτουν την όλη διαδικασία της κίνησης του μετώπου χωρίς το είδος της ‘‘αιφνίδιας μετάβασης ‘’ η οποία συνήθως παρουσιάζεται στις προηγούμενες μελέτες .Σε σύγκριση με αποτελέσματα προηγούμενων μελετών διαπιστώθηκε ότι γενικώς, τα βαρυτικά κύματα από θυρόφραγμα με μικρή φάση κατάπτωσης προσομοιάζονται με βαρυτικά κύματα σταθερής εκκένωσης εκτός εάν τα κύματα δημιουργούνται σε χρόνο που οι υδραυλικές διαδικασίες δεν επικρατούν

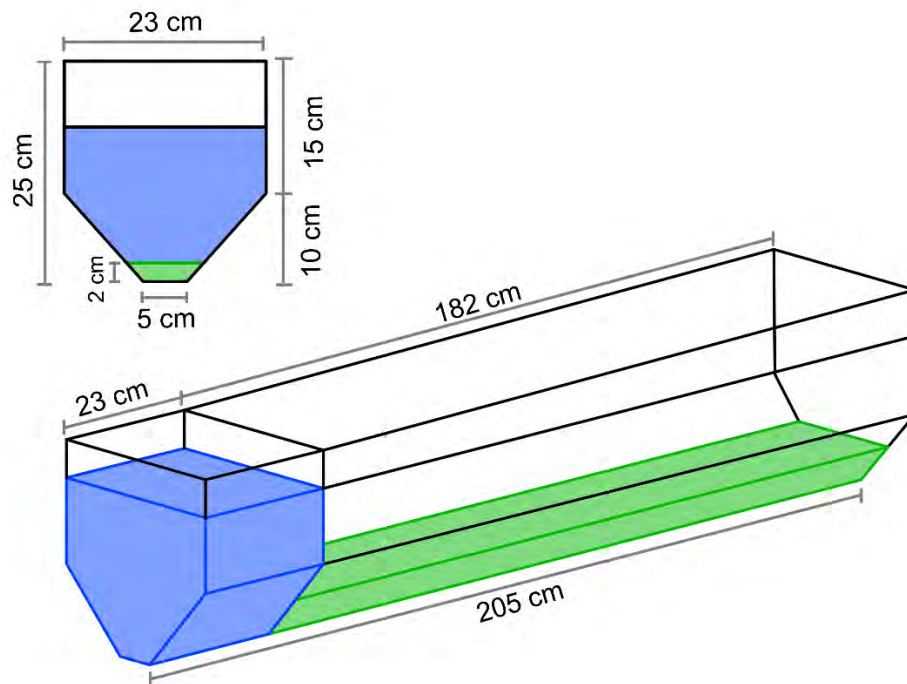
## Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ο τρόπος με τον οποίο παρασκευάστηκαν οι απαιτούμενες πυκνότητες και ο τρόπος με τον οποίο εκτελέστηκαν τα πειράματα, καθώς και ο τρόπος καταγραφής των ρευμάτων βαρύτητας.

### 3.1 Αναλυτική περιγραφή της κατασκευής

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μια τραπεζοειδή δεξαμενή μήκους 2.05m, πλάτους 23cm άνω και 5cm κάτω ενώ το βάθος της είναι 25cm. Η δεξαμενή χωρίζεται σε 2 μέρη από μια κατακόρυφη θυρίδα σε απόσταση 23cm από την αρχή της δεξαμενής, με τις διαστάσεις της τραπεζοειδούς διατομής της δεξαμενής και πάχους 2cm. Σε όλο το μήκος του πυθμένα της δεξαμενής της δεξαμενής μετά την μετακινούμενη θυρίδα τοποθετήθηκε πλαστικός χλοοτάπητας μήκους 1.82m πλάτους 5cm και ύψους 2cm ο οποίος σε κάθε πείραμα τοποθετούνταν στον πυθμένα της δεξαμενής. Στο πέρας της δεξαμενής υπάρχει σφαιρική εγκοπή στην οποία υπάρχει κάνουλα μονής ροής η οποία συνδέθηκε με πλαστικό σωλήνα προκειμένου να οδηγηθεί το νερό από την δεξαμενή στο σύστημα αποχετεύσεις του εργαστηρίου. Η δεξαμενή τοποθετήθηκε πάνω σε ένα τραπέζι όπου όμως κατά την εκτέλεση του πρώτου δοκιμαστικού πειράματος στο ανώτατο ύψος των 25cm διαπιστώθηκε ότι απέκλινε ως προς την οριζοντίωση. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν δύο ίδια κομμάτια σανίδας στην αρχή και στο πέρας της δεξαμενής τα οποία τοποθετήθηκαν με τον κατάλληλο τρόπο. Για την αποτύπωση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 2 προβολείς ένα σεντόνι ανάλογο των διαστάσεων της δεξαμενής για να λειτουργεί ως φόντο, 2 κάμερες υψηλής ευκρίνειας. Η μια κάμερα τοποθετήθηκε στο θυρόφραγμα που διαχώριζε το καθαρό νερό  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$  και του αλατόνερου και κατέγραφε την δημιουργία του ρεύματος μετά το άνοιγμα της θυρίδας και η δεύτερη κάμερα κατέγραφε την εξέλιξη του ρεύματος από την

στιγμή που άνοιγε η θυρίδα μέχρι το πέρας της δεξαμενής. Προκειμένου να επιτευχθεί η οπτικοποίηση του ρεύματος βαρύτητας χρησιμοποιήθηκε ροδαμίνη την οποία αναμειγνύαμε με το αλατισμένο αλατισμένο νερό αριστερά της θυρίδας. Μετά το πέρας κάθε πειράματος η δεξαμενή και ο χλοοτάπητας καθαριζόταν με ιδιαίτερη προσοχή λόγω της τοξικότητας της ροδαμίνης. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε τέσσερα ύψη για πέντε διαφορετικές πυκνότητες. Πριν από κάθε εκτέλεση του πειράματος μετρήθηκε με χρήση αναλογικού θερμόμετρου η θερμοκρασία του καθαρού νερού στην δεξαμενή η οποία κυμάνθηκε από 15°C έως 15.8°C.



Εικόνα 3.1.1 Δεξαμενή από plexiglass. Στον πυθμένα της δεξαμενής υπάρχει βλάστηση ύψους 2εκ.

### 3.2 Παρασκευή απαιτούμενης αλατότητας

Ο πιο σημαντικός παράγοντας για την σωστή εκτέλεση του πειράματος ήταν η παρασκευή των κατάλληλων πυκνοτήτων αλατότητας. Προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη αλατότητα καθ' ύψος χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικές μέθοδοι παρασκευής. Για

το χαμηλό ύψος των 5cm στο μέσον της κάτω τραπεζοειδούς διατομής της δεξαμενής, λόγω του μεγέθους της συσκευής μέτρησης πυκνότητας (πυκνόμετρο) ήταν αδύνατη η παρασκευή των αλατοτήτων στην δεξαμενή. Για τον λόγο αυτό η παρασκευή κάθε αλατότητας εκτελούνταν σε δοκιμαστικό σωλήνα όγκου ενός λίτρου. Εκεί παρασκευάστηκαν οι επιθυμητές πυκνότητες με την χρήση του πυκνόμετρου και στην συνέχεια το αλατόνερο αδειάζοταν στο αριστερό μέρος της δεξαμενής. Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε και στο ύψος των 10cm στο ανώτερο σημείο της κάτω τραπεζοειδούς διατομής με την διαφορά ότι λόγω της μεγαλύτερης απαίτησης αλατόνερο χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικός σωλήνας των δύο λίτρων. Στα ανώτερα ύψη στο μέσον της τετραγωνικής διατομής 17.5cm χρησιμοποιήθηκε διαφορετική μέθοδος παρασκευής των απαιτούμενων πυκνοτήτων. Το ύψος ήταν επαρκές προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το πυκνόμετρο εντός της δεξαμενής, οπότε η διαδικασία που γινόταν στον δοκιμαστικό σωλήνα πραγματοποιήθηκε εντός της δεξαμενής. Η ίδια διαδικασία παρασκευής αλατόνερου ακολουθήθηκε και για το ανώτερο ύψος της ορθογωνικής διατομής στα 25cm.

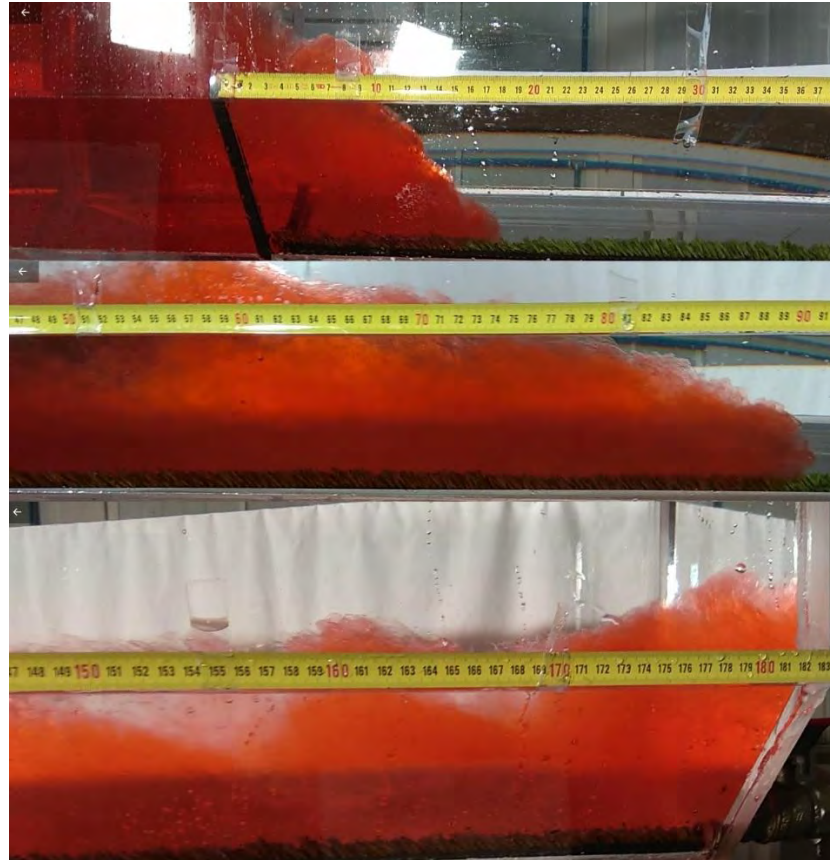
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )				
H (cm)	5	1050	1060	1070	1080	1090
	10	1050	1060	1070	1080	1090
	17.5	1050	1060	1070	1080	1090
	25	1050	1060	1070	1080	1090

Πίνακας 3.2.1 Πίνακας πυκνοτήτων που επιτεύχθηκαν στην πειραματική διάταξη.

### 3.3 Εκτέλεση πειραμάτων

Κατά την προετοιμασία του πειράματος καθαρίζεται η δεξαμενή προκειμένου να μην υπάρξει οποιαδήποτε αλλοίωση του πειράματος. Στην συνέχεια τοποθετείται ο πλαστικός χλοοτάπητας με την χρήση κολλητικής ταινίας διπλής όψεως. Πριν από την εκτέλεση κάθε πειράματος η θυρίδα. Σε κάθε δεξαμενή τοποθετείται νερό ομοιογενούς πυκνότητας  $\rho_i$ . Αφού γίνει η απαιτούμενη παρασκευή αλατόνερου μέσω των μεθόδων που αναφέρθηκαν, στην

συνέχεια γίνεται πλήρωση νερού  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  στο απαιτούμενο ύψος κάθε φορά στο δεξιό τμήμα της δεξαμενής. Στην συνέχεια τοποθετείται ροδαμίνη στο αλατόνερο προκειμένου να επιτευχθεί η οπτικοποίηση του φαινομένου. Πριν την εκτέλεση κάθε πειράματος γίνεται ο απαραίτητος έλεγχος για τυχόν διαρροή κάτω καθώς και πλευρικά από την θυρίδα. Για τον λόγο αυτό τοποθετείται μονωτικό υλικό κατάλληλων διαστάσεων στην εγκοπή μεταξύ θυρίδας και δεξαμενής, καθώς επίσης και υδραυλικό teflon περιμετρικά της θυρίδας. Εφόσον οι έλεγχοι είναι σωστοί ξεκινάει η διαδικασία της εκτέλεσης του πειράματος. Μπαίνουν σε λειτουργία οι δύο προβολείς και μετριέται η θερμοκρασία του καθαρού νερού. Τοποθετείται σε τρίποδα η κάμερα υψηλής ευκρίνειας στο ύψος της δεξαμενής στην θέση του θυροφράγματος. Με την ακαριαία αφαίρεση της θυρίδας ξεκινάει η ψηφιακή καταγραφή του πειράματος, δύο αντίθετα ρεύματα βαρύτητας απελευθερώνονται στην ελεύθερη επιφάνεια και στον αδιαπέρατο πυθμένα με βλάστηση. Το ρεύμα βαρύτητας που μελετάται είναι αυτό που δημιουργείται από το υγρό με την μεγαλύτερη πυκνότητα. Η κάμερα που βρίσκεται σταθερή καταγράφει την αρχή διάδοσης του ρεύματος, ενώ η δεύτερη κάμερα καταγράφει το ρεύμα βαρύτητας που διαδίδεται μέχρι το τέλος της δεξαμενής. Το μέτωπο του ρεύματος βαρύτητας καθώς και το προφίλ της ταχύτητας κατά μήκος της βλάστησης καταγράφονται. Μετά το πέρας του κάθε πειράματος η κάνουλα στο τέλος της δεξαμενής ανοίγει το νερό μέσω πλαστικού σωλήνα προωθείται στην αποχέτευση του εργαστηρίου, η δεξαμενή και ο χλοοτάπητας καθαρίζονται με καθαρό νερό, προκειμένου η διαδικασία να επαναληφθεί για το επόμενο πείραμα.



Εικόνα 3.3.1 Στιγμιότυπα εξέλιξης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$ , αρχή μέσον και τέλος της απόστασης.



## Κεφάλαιο 4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

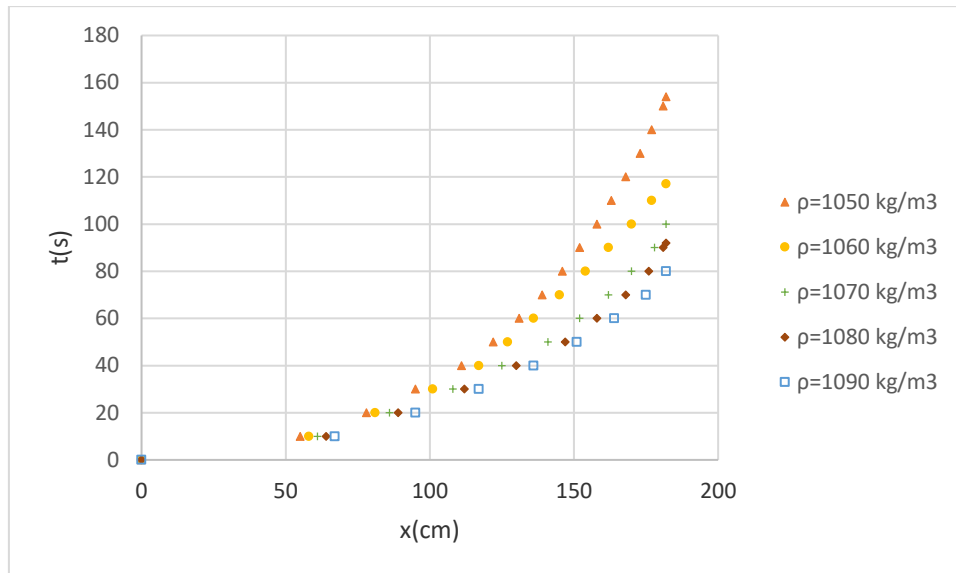
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα συγκριτικά διαγράμματα των ρευμάτων βαρύτητας των πειραμάτων. Στο πρώτο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ ρευμάτων ίδιας πυκνότητας σε δύο διαφορετικές αρχικές στάθμες στην τραπεζοειδή διατομή ενώ στο δεύτερο υποκεφάλαιο για δύο διαφορετικές στάθμες στην σύνθετη διατομή. Ακόμη, παρουσιάζονται αδιαστατοποιημένα διαγράμματα όλων των πειραμάτων της εργασίας αλλά και παρόμοιων μελετών από τους Monaghan et al. (2009), Shin et al. (2004), όπως επίσης Κεραμάρης και Πρίνος (2016) με στόχο την σύγκριση των πειραμάτων, αλλά και την εύρεση ή όχι συμφωνίας.

### 4.1 Σύγκριση πειραμάτων στην τραπεζοειδή διατομή

Στα σχήματα 4.1.1 και 4.1.2 παρουσιάζεται η επίδραση της πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος κατά μήκος της βλάστησης στον πυθμένα. Παρατηρείται ότι το ρεύμα με την μέγιστη διαφορά πυκνότητας  $\Delta\rho/\rho_v = 90\%$  διανύει την απόσταση ως το τέλος της δεξαμενής σε λιγότερο χρόνο, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των δύο ρευστών (αλατόνερου και καθαρού νερού), τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα διάδοσης του μετώπου. Επίσης παρατηρείται ότι η επίδραση της βλάστησης στην διάδοση του ρεύματος είναι σημαντικότερη στο χαμηλότερο υψόμετρο, καθώς η τραχύτητα της επηρεάζει σημαντικά. Τα πειράματα στην τραπεζοειδή διατομή πραγματοποιήθηκαν με αρχικά υψόμετρα  $H_0=5\text{cm}$  και  $H_0=10\text{cm}$ .

Στο χαμηλότερο αρχικό υψόμετρο των  $H_0=5\text{cm}$  ο χρόνος που χρειάζεται το ρεύμα για να διανύσει την απόσταση ως το πέρας της δεξαμενής είναι σαφώς μικρότερος για την μέγιστη

πυκνότητα  $t=80\text{sec}$ . Αντίστοιχα για την ελάχιστη πυκνότητα  $\Delta\rho/\rho_v=50\%$  είναι σαφώς μεγαλύτερος  $t=154\text{sec}$ . Η χρονική αυτή διαφορά οφείλεται στην διαφορά πυκνότητας.



Σχήμα 4.1.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος τραπεζοειδούς διατομής με  $H_0=5\text{cm}$

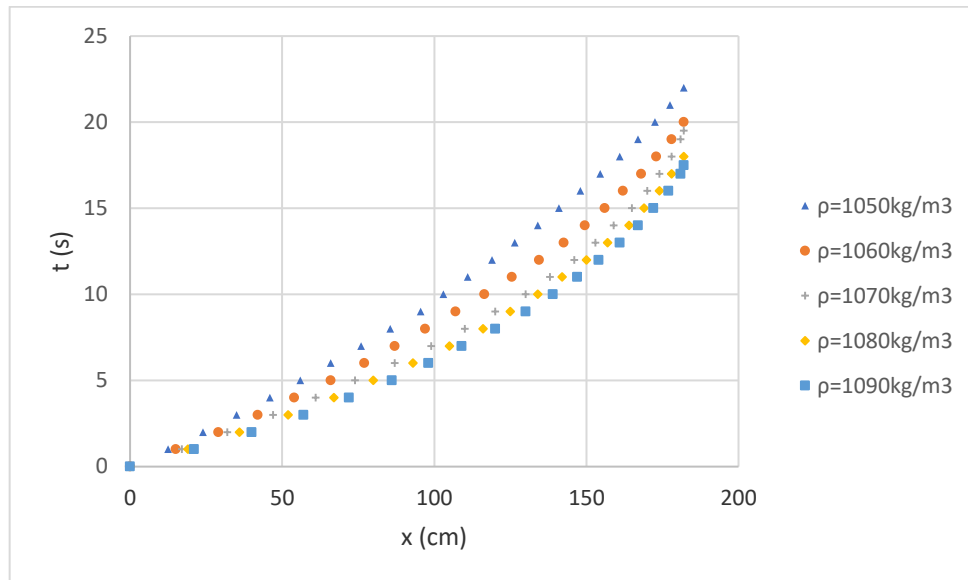
Παρατηρείται μια γραμμικότητα κατά την διάρκεια διάδοσης του μετώπου του ρεύματος, ενώ ο χρόνος δι μειώνεται όσο πυκνότητα του ρευστού ( $\Delta\rho/\rho_v$ ) αυξάνεται.

$\rho=1050\text{kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$			$\rho=1060\text{kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$			$\rho=1070\text{kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$			$\rho=1080\text{kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$			$\rho=1090\text{kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$		
x(cm)	t(sec.)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec.)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec.)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec.)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec.)	U(cm/sec)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	10	5,5	58	10	5,8	61	10	6,1	64	10	6,4	67	10	6,7
78	20	2,3	81	20	2,3	86	20	2,5	89	20	2,5	95	20	2,8
95	30	1,7	101	30	2	108	30	2,2	112	30	2,3	117	30	2,2
111	40	1,6	117	40	1,6	125	40	1,7	130	40	1,8	136	40	1,9
122	50	1,1	127	50	1	141	50	1,6	147	50	1,7	151	50	1,5
131	60	0,9	136	60	0,9	152	60	1,1	158	60	1,1	164	60	1,3
139	70	0,8	145	70	0,9	162	70	1	168	70	1	175	70	1,1
146	80	0,7	154	80	0,9	170	80	0,8	176	80	0,8	182	80	0,7
152	90	0,6	162	90	0,8	178	90	0,8	181	90	0,5			
158	100	0,6	170	100	0,8	182	100	0,4	182	92	0,5			
163	110	0,5	177	110	0,7									
168	120	0,5	182	117	0,69									
173	130	0,5												
177	140	0,4												
181	150	0,4												
182	154	0,25												

Πίνακας 4.1.2 Αποτελέσματα χρονικής εξέλιξης του ρεύματος για το αρχικό υψόμετρο  $H_0=5\text{cm}$  για τις διάφορες πυκνότητες.

Στο ανώτερο υψόμετρο  $H_0=10\text{cm}$  της τραπεζοειδούς διατομής παρατηρείται ότι η βλάστηση έχει μικρότερη επίδραση στην διάδοση του μετώπου σε σχέση με το χαμηλότερο υψόμετρο

$H_0=5\text{cm}$  καθώς οι χρόνοι που χρειάζεται το ρεύμα για να διανύσει το μήκος της δεξαμενής είναι σαφώς μικρότεροι, ακόμη και στις μικρότερες πυκνότητες. Επίσης παρατηρείται ότι η ταχύτητα διάδοσης του μετώπου είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η πυκνότητα του ρευστού.



Σχήμα 4.1.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου για αρχικό υψόμετρο  $H_0=10\text{cm}$

Παρατηρείται ότι υπάρχει γραμμικότητα κατά την διάρκεια μετάδοσης των μετώπων. Ο χρόνος δτ μειώνεται όσο αυξάνεται η πυκνότητα του ρευστού ( $\Delta\rho/\rho_v$ ), ενώ σαφώς η αύξηση του αρχικού υψομέτρου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του μετώπου του ρεύματος.

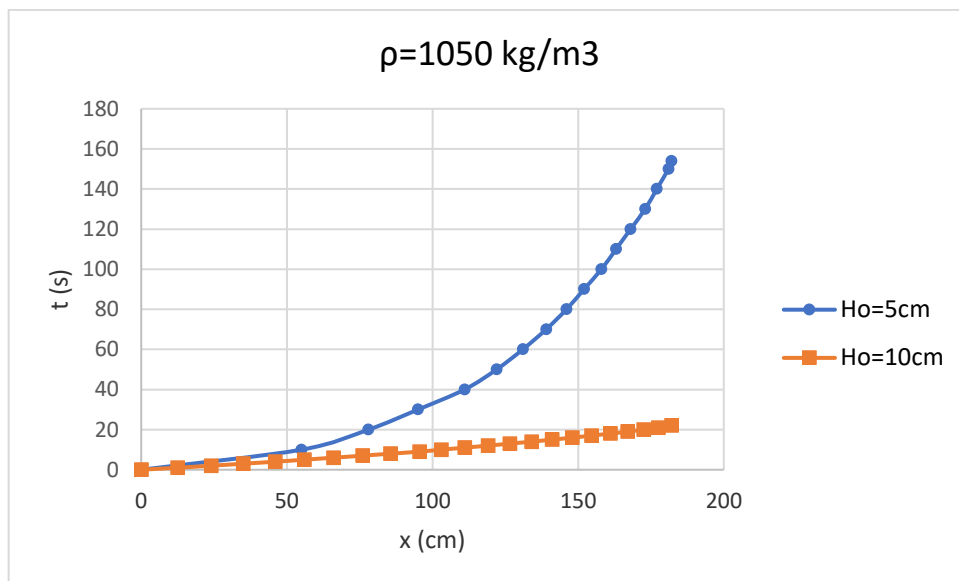
Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν ως εξής:

$\rho=1050\text{kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$			$\rho=1060\text{kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$			$\rho=1070\text{kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$			$\rho=1080\text{kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$			$\rho=1090\text{kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$		
x(cm)	t(sec)	u(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	u(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	u(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	u(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	u(cm/sec)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12,5	1	12,5	15	1	15	17	1	17	19	1	19	21	1	21
24	2	11,5	29	2	14	32	2	15	36	2	17	40	2	19
35	3	11	42	3	13	47	3	15	52	3	16	57	3	17
46	4	11	54	4	12	61	4	14	67	4	15	72	4	15
56	5	10	66	5	12	74	5	13	80	5	13	86	5	14
66	6	10	77	6	11	87	6	13	93	6	13	98	6	12
76	7	10	87	7	10	99	7	12	105	7	12	109	7	11
85,5	8	9,5	97	8	10	110	8	11	116	8	11	120	8	11
95,5	9	10	107	9	10	120	9	10	125	9	9	130	9	10
103	10	7,5	116,5	10	9,5	130	10	10	134	10	9	139	10	9
111	11	8	125,5	11	9	138	11	8	142	11	8	147	11	8
119	12	8	134,5	12	9	146	12	8	150	12	8	154	12	7
126,5	13	7,5	142,5	13	8	153	13	7	157	13	7	161	13	7
134	14	7,5	149,5	14	7	159	14	6	164	14	7	167	14	6
141	15	7	156	15	6,5	165	15	6	169	15	5	172	15	5
148	16	7	162	16	6	170	16	5	174	16	5	177	16	5
154,5	17	6,5	168	17	6	174	17	4	178	17	4	181	17	4
161	18	6,5	173	18	5	178	18	4	182	18	4	182	17,5	2
167	19	6	178	19	5	181	19	3						
172,5	20	5,5	182	20	4	182	19,5	2						
177,5	21	5												
182	22	4,5												

Πίνακας 4.1.4 Αποτελέσματα χρονικής εξέλιξης του ρεύματος για το αρχικό υψόμετρο  $H_0=10\text{cm}$  για τις διάφορες πυκνότητες.

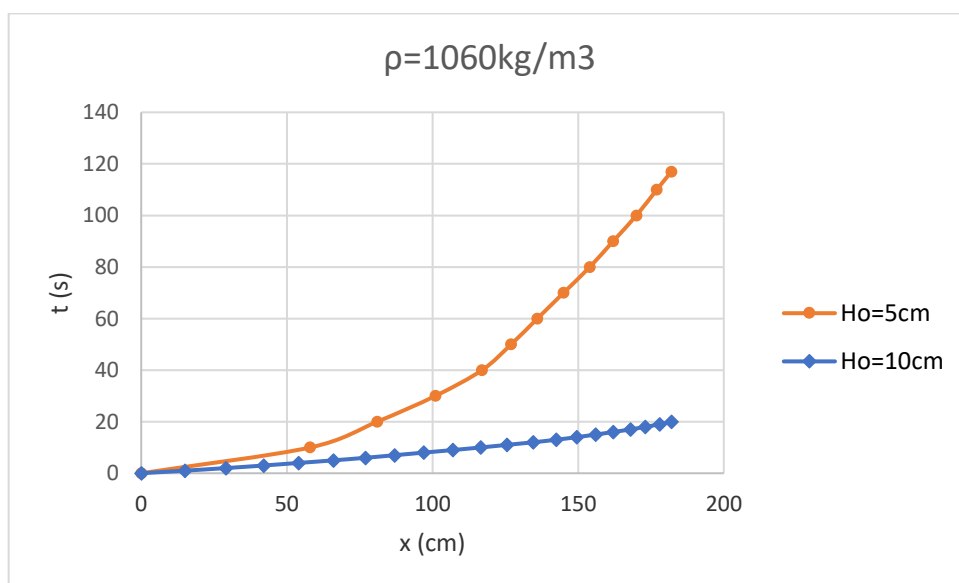
Στην συνέχεια συγκρίνοντας τα ρεύματα βαρύτητας της εκάστοτε πυκνότητας για τα δύο αρχικά υψόμετρα γίνεται αντιληπτή μια σημαντική απόκλιση στους χρόνους διάδοσης του μετώπου των ρευμάτων. Συγκεκριμένα διαφορά  $\Delta t=132\text{sec}$ . στα ρεύματα με την μικρότερη διαφορά πυκνότητας ( $\Delta\rho/\rho_v=50\%$ ), ενώ αντίστοιχα η διαφορά στα ρεύματα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας είναι  $\Delta t=62.5\text{sec}$ . Παρατηρείται ότι λόγω του αρχικού υψομέτρου  $H_0$ , τα ρεύματα βαρύτητας με το μεγαλύτερο αρχικό υψόμετρο αναπτύσσουν μεγαλύτερες ταχύτητες.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορές των δύο υψομέτρων για κάθε πυκνότητα:



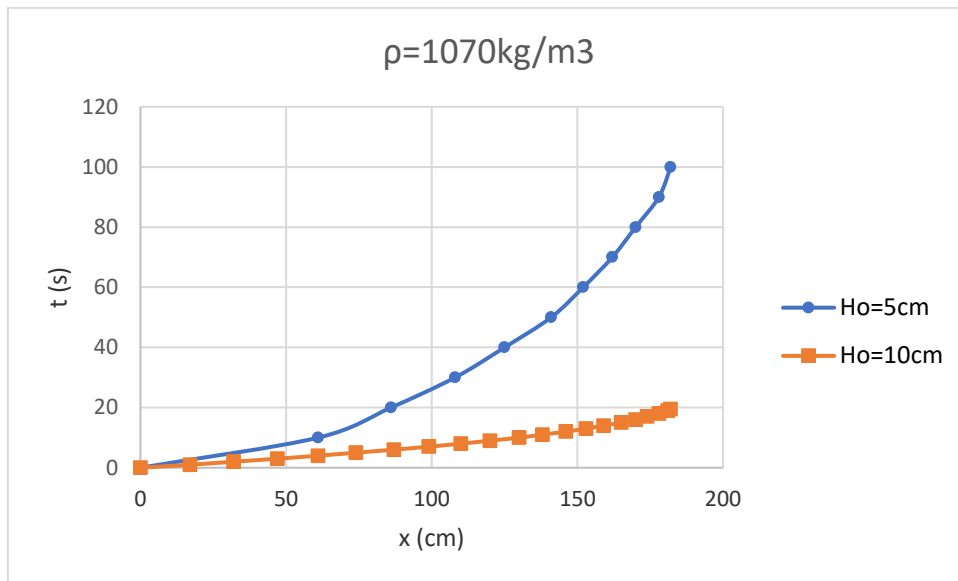
Σχήμα 4.1.5 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$  για αρχικά υψόμετρα  $H_0=5\text{cm}$  και  $H_0=10 \text{ cm}$

Η διαφορά δι της εξέλιξης των δύο ρευμάτων ως το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 132sec.



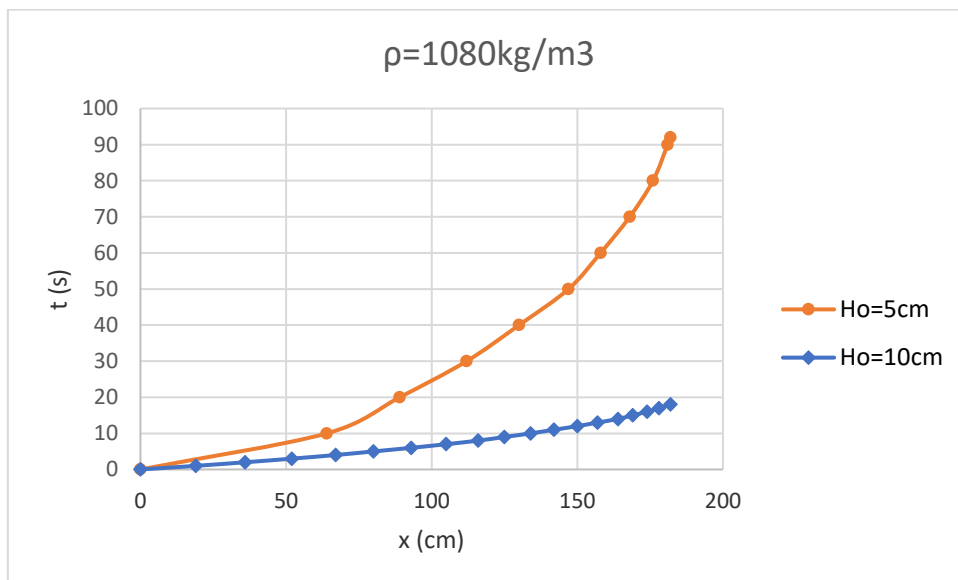
Σχήμα 4.1.6 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για αρχικά υψόμετρα  $H_0=5\text{cm}$  και  $H_0=10 \text{ cm}$

Η διαφορά της εξέλιξης των δύο ρευμάτων ως το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 97sec.



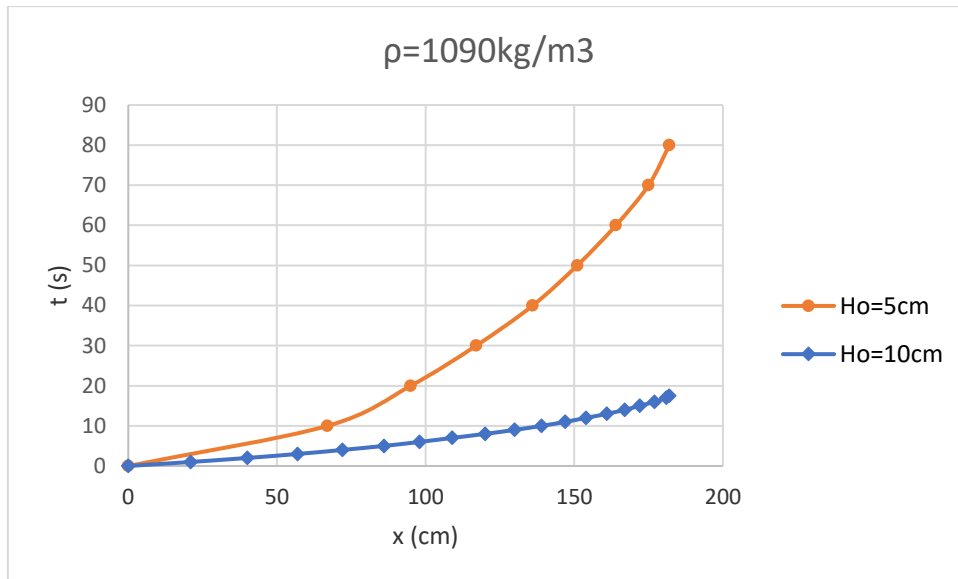
Σχήμα 4.1.7 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για αρχικά υψόμετρα  $H_o=5\text{cm}$  και  $H_o=10 \text{ cm}$

Η διαφορά της εξέλιξης των δύο ρευμάτων ως το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 80.5sec.



Σχήμα 4.1.8 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για αρχικά υψόμετρα  $H_o=5\text{cm}$  και  $H_o=10 \text{ cm}$

Η διαφορά της εξέλιξης των δύο ρευμάτων ως το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 74sec.



Σχήμα 4.1.9 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για αρχικά υψόμετρα  $H_o=5\text{cm}$  και  $H_o=10 \text{ cm}$

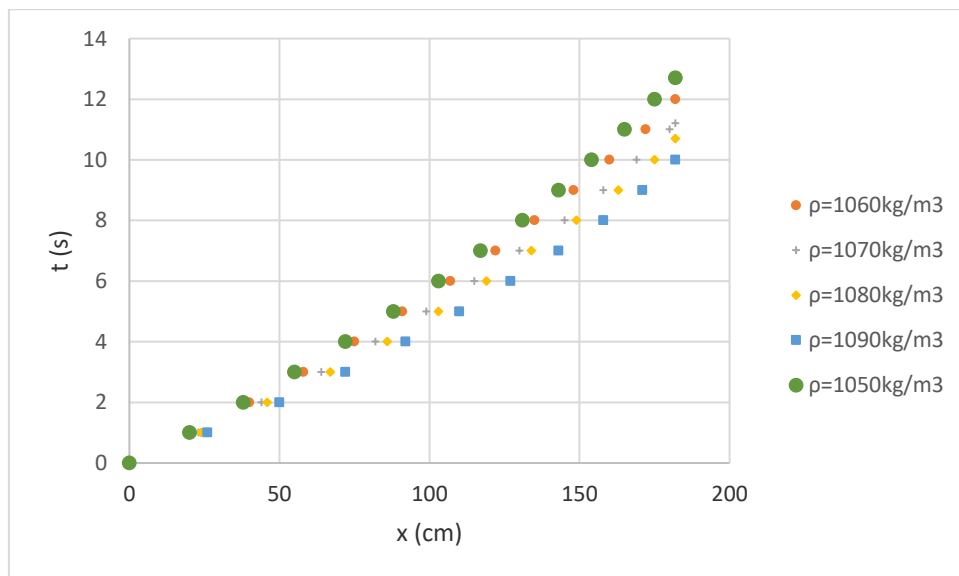
Η διαφορά της εξέλιξης των δύο ρευμάτων ως το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 62.5 sec.

## 4.2 Σύγκριση ρευμάτων βαρύτητας στην σύνθετη διατομή

Στα δύο ανώτερα ύψη του σετ των πειραμάτων που βρίσκονται στην σύνθετη διατομή παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο ως προς την ταχύτητα διάδοσης του μετώπου του ρεύματος. Δηλαδή το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας ( $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ ) ταξιδεύει γρηγορότερα. Ωστόσο μια ειδοποιός διαφορά που παρατηρείται στην σύνθετη διατομή είναι το γεγονός ότι η παρουσία βλάστησης στον πυθμένα της δεξαμενής δεν δημιουργεί τόσο μεγάλη διαφορά χρόνου μεταξύ των δύο διαφορετικών αρχικών υψομέτρων, όπως αυτό είχε

παρατηρηθεί στην τραπεζοειδή διατομή, διότι η τραχύτητα της βλάστησης δεν επηρεάζει το ίδιο σημαντικά τις ταχύτητες των ρευμάτων βαρύτητας όπως στα χαμηλότερα υψόμετρα της τραπεζοειδούς διατομής.

Στο χαμηλότερο αρχικό υψόμετρο  $H_0=17.5\text{cm}$  της σύνθετης διατομής η απόσταση των  $182\text{cm}$  έως το πέρας της δεξαμενής καλύπτεται από το μέτωπο του ρεύματος σε χρόνο  $t=12.7\text{sec}$  για την χαμηλότερη πυκνότητα  $\Delta\rho/\rho_v=50\%$ , ενώ αντίστοιχα σε  $t=10\text{sec}$  από το ρεύμα με την μεγαλύτερη πυκνότητα  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ .



Σχήμα 4.2.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος σύνθετης διατομής με  $H_0=17.5\text{cm}$

Παρατηρείται μια γραμμικότητα κατά την διάρκεια μετάδοσης των μετώπων των ρευμάτων, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά της πυκνότητας τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος  $t$ . Στην εξέταση της σύνθετης διατομής είναι εμφανές ότι ο χρόνος μετάβασης των ρευμάτων βαρύτητας που απαιτείται από το θυρόφραγμα μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι μικρότερος σε σχέση με αυτών στην τραπεζοειδή. Η γεωμετρία της δεξαμενής επηρεάζει την διάδοση του ρεύματος βαρύτητας.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν ως εξής:

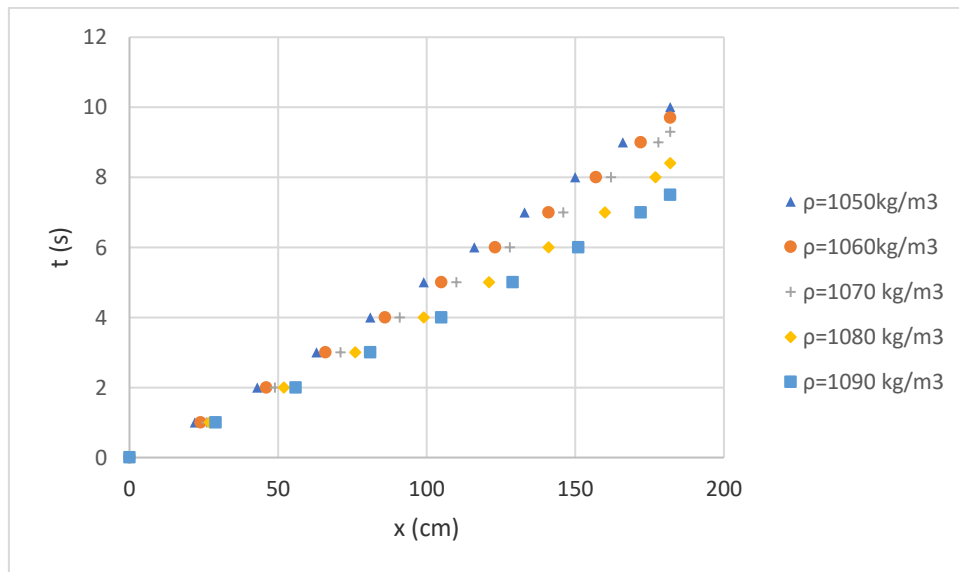


$\rho=1050\text{kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$			$\rho=1060\text{kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$			$\rho=1070\text{kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$			$\rho=1080\text{kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$			$\rho=1090\text{kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$		
x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1		21	1	21	23	1	23	24	1	24	26	1	26
38	2		18	2	19	44	2	21	46	2	22	50	2	24
55	3		17	3	18	64	3	20	67	3	21	72	3	22
72	4		17	4	17	82	4	18	86	4	19	92	4	20
88	5		16	5	16	99	5	17	103	5	17	110	5	18
103	6		15	6	16	115	6	16	119	6	16	127	6	17
117	7		14	7	15	130	7	15	134	7	15	143	7	16
131	8		14	8	13	145	8	15	149	8	15	158	8	15
143	9		12	9	13	158	9	13	163	9	14	171	9	13
154	10		11	10	12	169	10	11	175	10	12	182	10	11
165	11		11	11	12	180	11	11	182	10,7	10			
175	12		10	12	10	182	11,2	10						
182	12,7	10												

Πίνακας 4.2.2 Δεδομένα χρονικής εξέλιξης με αρχικό ύψος  $H_0=17.5\text{cm}$  για τις διάφορες πυκνότητες

Παρατηρείται ότι η διαφορά δι μεταξύ του ρεύματος με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας σε σχέση με αυτό με την μικρότερη διαφορά πυκνότητας είναι της τάξεως των 2.7sec. Το ρεύμα βαρύτητας στην σύνθετη διατομή είναι ταχύτερο σε όλες τις περιπτώσεις σε σύγκριση με την τραπεζοειδή διατομή.

Στο ανώτερο αρχικό ύψος  $H_0=25\text{cm}$  της σύνθετης διατομής το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας ( $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ ) χρειάστηκε χρόνο  $t=7.5\text{sec}$ . για να διανύσει την απόσταση μέχρι το πέρας την δεξαμενής ενώ αντίστοιχα το ρεύμα με την χαμηλότερη διαφορά πυκνότητας χρειάστηκε χρόνο  $t=10\text{sec}$ .



Σχήμα 4.2.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος σύνθετης διατομής με  $H_0=25\text{cm}$

Παρατηρείται ότι η ταχύτητα διάδοσης του ρεύματος βαρύτητας είναι μεγαλύτερη από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάστηκαν τόσο στην σύνθετη, όπως επίσης και στην τραπεζοειδή διατομή. Γίνεται σαφές ότι σημαντική παράμετρο αποτελεί το αρχικό ύψος  $H_0$  στην διάδοση του ρεύματος, ενώ όσο αυξάνεται το ύψος τόσο περισσότερο υποβαθμίζεται ο ρόλος της βλάστησης ( $h=2\text{cm}$ ) στην ταχύτητα διάδοσης του μετώπου. Επίσης όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις υπάρχει μια γραμμικότητα μεταξύ του χρόνου  $t$  και της απόστασης  $x$ .

Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν ως εξής:

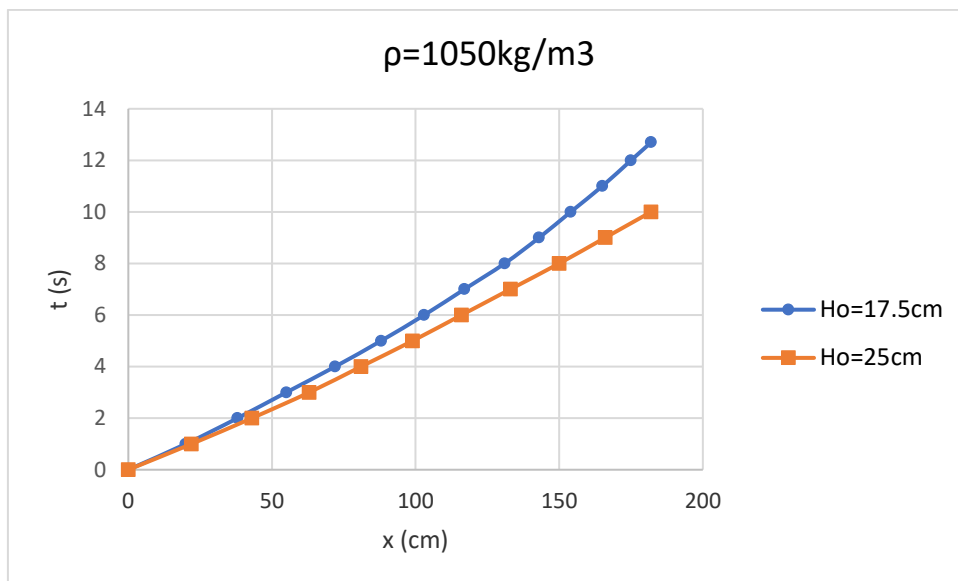
$\rho=1050\text{kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$			$\rho=1060\text{kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$			$\rho=1070\text{kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$			$\rho=1080\text{kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$			$\rho=1090\text{kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$		
x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)	x(cm)	t(sec)	U(cm/sec)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	1	22	24	1	24	26	1	26	27	1	27	29	1	29
43	2	21	46	2	22	49	2	23	52	2	25	56	2	27
63	3	20	66	3	20	71	3	22	76	3	24	81	3	25
81	4	18	86	4	20	91	4	20	99	4	23	105	4	24
99	5	18	105	5	19	110	5	19	121	5	22	129	5	24
116	6	17	123	6	18	128	6	18	141	6	20	151	6	22
133	7	17	141	7	18	146	7	18	160	7	19	172	7	21
150	8	17	157	8	16	162	8	16	177	8	17	182	7,5	20
166	9	16	172	9	15	178	9	16	182	8,4	12,5			
182	10	16	182	9,7	14,28571	182	9,3	13,33333						

Πίνακας 4.2.4 Δεδομένα χρονικής εξέλιξης με αρχικό ύψος  $H_0=25\text{cm}$  για τις διάφορες πυκνότητες

Οι χρόνοι  $t$  που χρειάζονται τα ρεύματα βαρύτητας στο υψηλότερο σημείο της σύνθετης διατομής είναι σημαντικά μικρότεροι σε σχέση με αυτούς της τραπεζοειδούς διατομής, ενώ η τραχύτητα της βλάστηση δεν εμποδίζει το ίδιο σημαντικά την ταχύτητα του ρεύματος. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας διαδίδεται ταχύτερα.

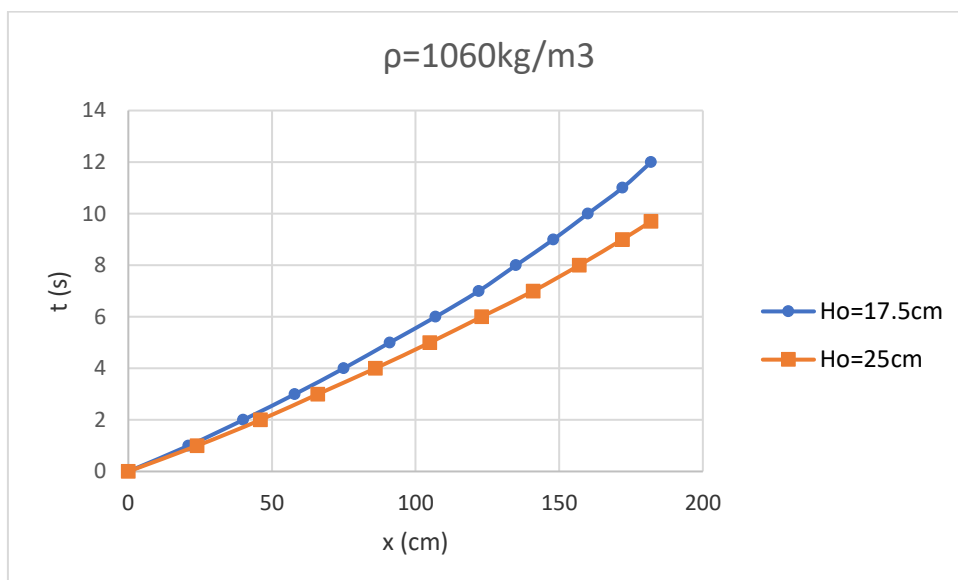
Όπως και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο στα ρεύματα της εκάστοτε πυκνότητας για τα δύο διαφορετικά υψόμετρα της σύνθετης διατομής, παρατηρήθηκε απόκλιση στους χρόνους διάδοσης του μετώπου των ρευμάτων ως το πέρας της δεξαμενής. Στην περίπτωση αυτή οι χρονικές διαφορές  $\Delta t$  είναι σημαντικά μικρότερες σε σύγκριση με την τραπεζοειδή διατομή, της τάξεως των 2.7sec. για την μικρότερη διαφορά πυκνότητας ( $\Delta\rho/\rho_n=50\%$ ), ενώ αντίστοιχα 2.5sec. για την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας ( $\Delta\rho/\rho_n=90\%$ )

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορές των δύο διαφορετικών υψομέτρων  $H_0$  για κάθε πυκνότητα:



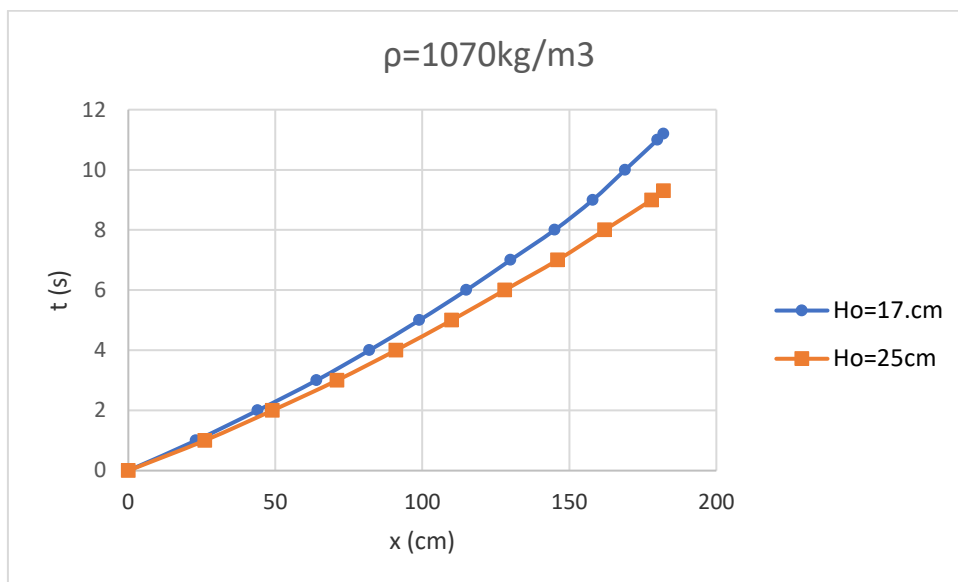
Σχήμα 4.2.5 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$  για  $H_o=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η χρονική διαφορά  $\Delta t$  για τα δύο διαφορετικά υψόμετρα μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 2.7sec.



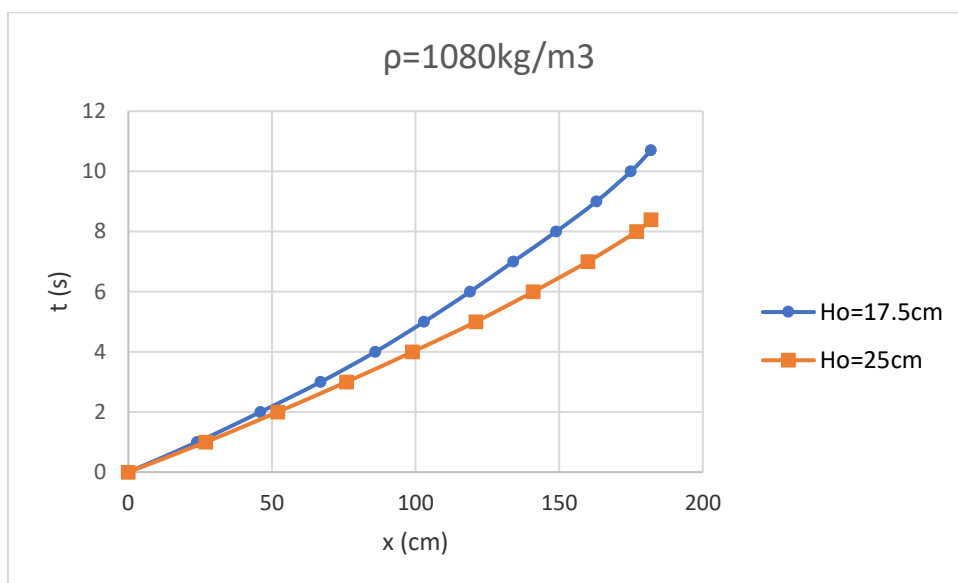
Σχήμα 4.2.6 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$  για  $H_o=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η χρονική διαφορά  $\Delta t$  των δύο διαφορετικών υψομέτρων μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 2.3sec.



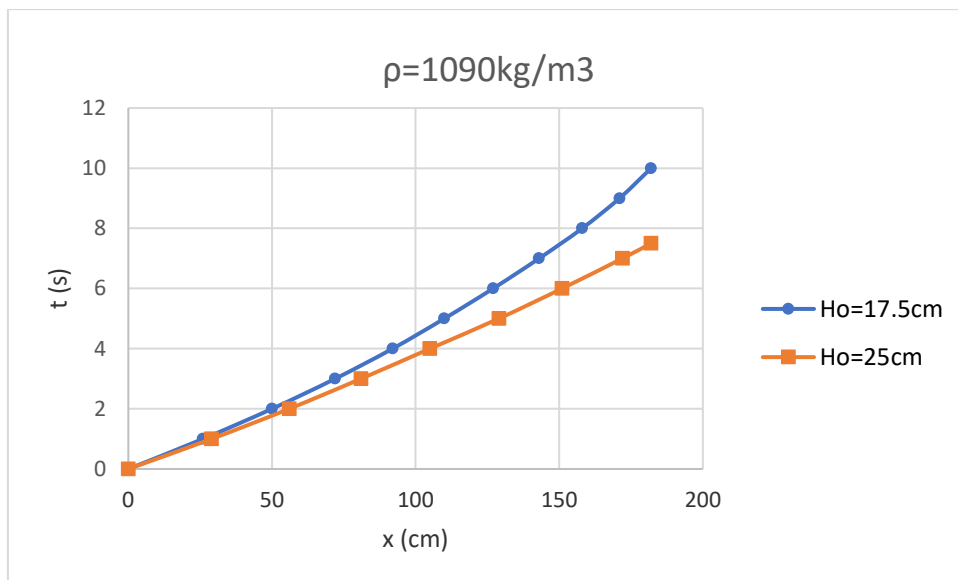
Σχήμα 4.2.7 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$  για  $H_o=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η χρονική διαφορά  $\Delta t$  για τα δύο διαφορετικά υψόμετρα μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως του 1.9sec.



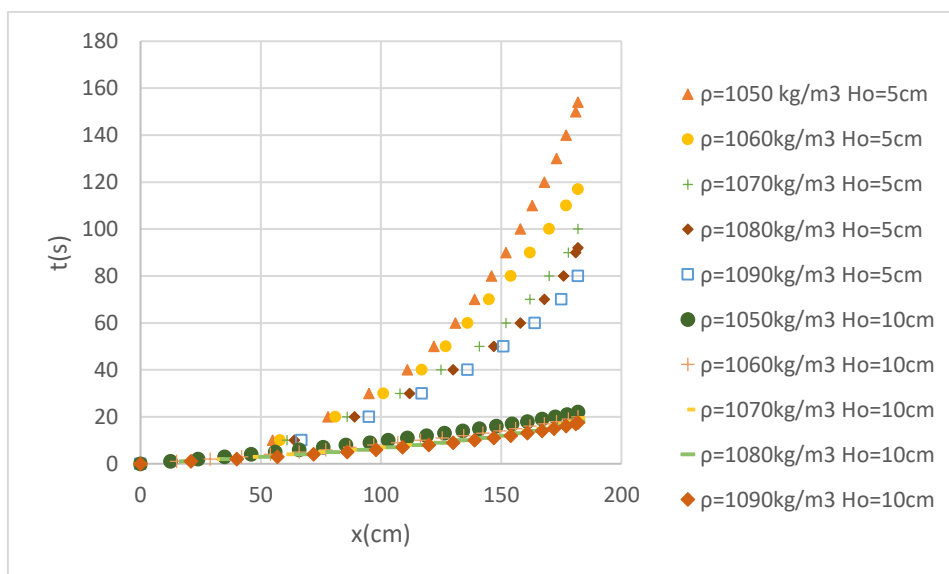
Σχήμα 4.2.8 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$  για  $H_o=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η χρονική διαφορά  $\Delta t$  για τα δύο διαφορετικά υψόμετρα μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 2.3sec.



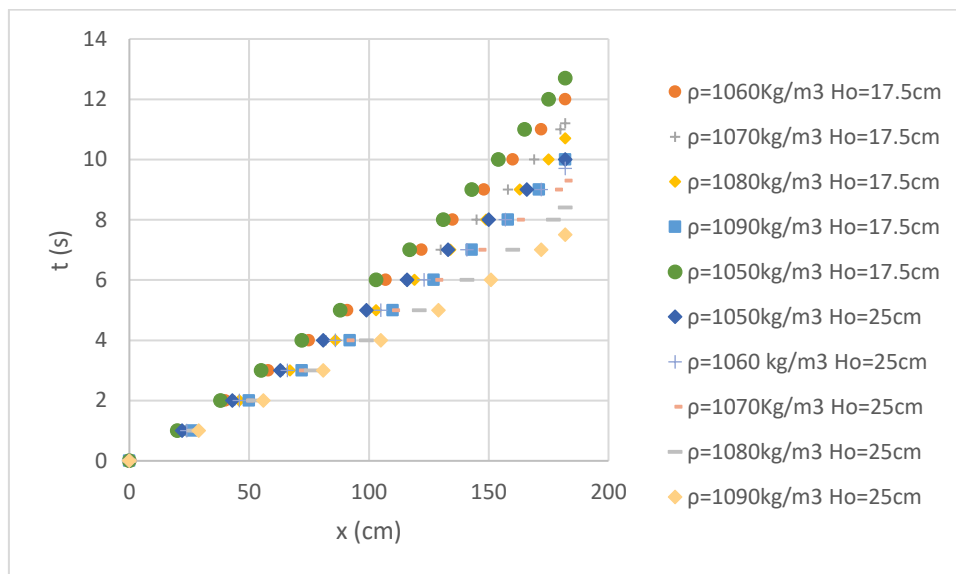
Σχήμα 4.2.9 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$  για  $H_o=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η χρονική διαφορά  $\Delta t$  για τα δύο διαφορετικά υψόμετρα μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι της τάξεως των 2.5sec.



Σχήμα 4.2.10 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος βαρύτητας στην τραπεζοειδή διατομή  $H_o=5\text{cm}, H_o=10\text{cm}$

Παρατηρείται η μεγάλη χρονική απόκλιση που υπάρχει στον χρόνο που απαιτείται για να φτάσει το μέτωπο του ρεύματος στο πέρας της δεξαμενής, στην σύγκριση των δύο υψομέτρων της τραπεζοειδούς διατομής. Σημαντικός παράγοντας στην εξάπλωση του ρεύματος είναι η βλάστηση, η τραχύτητα της οποίας έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση του μετώπου. Επίσης και στις δύο περιπτώσεις το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας κινείται ταχύτερα.



Σχήμα 4.2.11 Χρονική εξέλιξη μετώπου ρεύματος βαρύτητας στην σύνθετη διατομή  $H_o=17.5\text{cm}$ ,  $H_o=25\text{cm}$

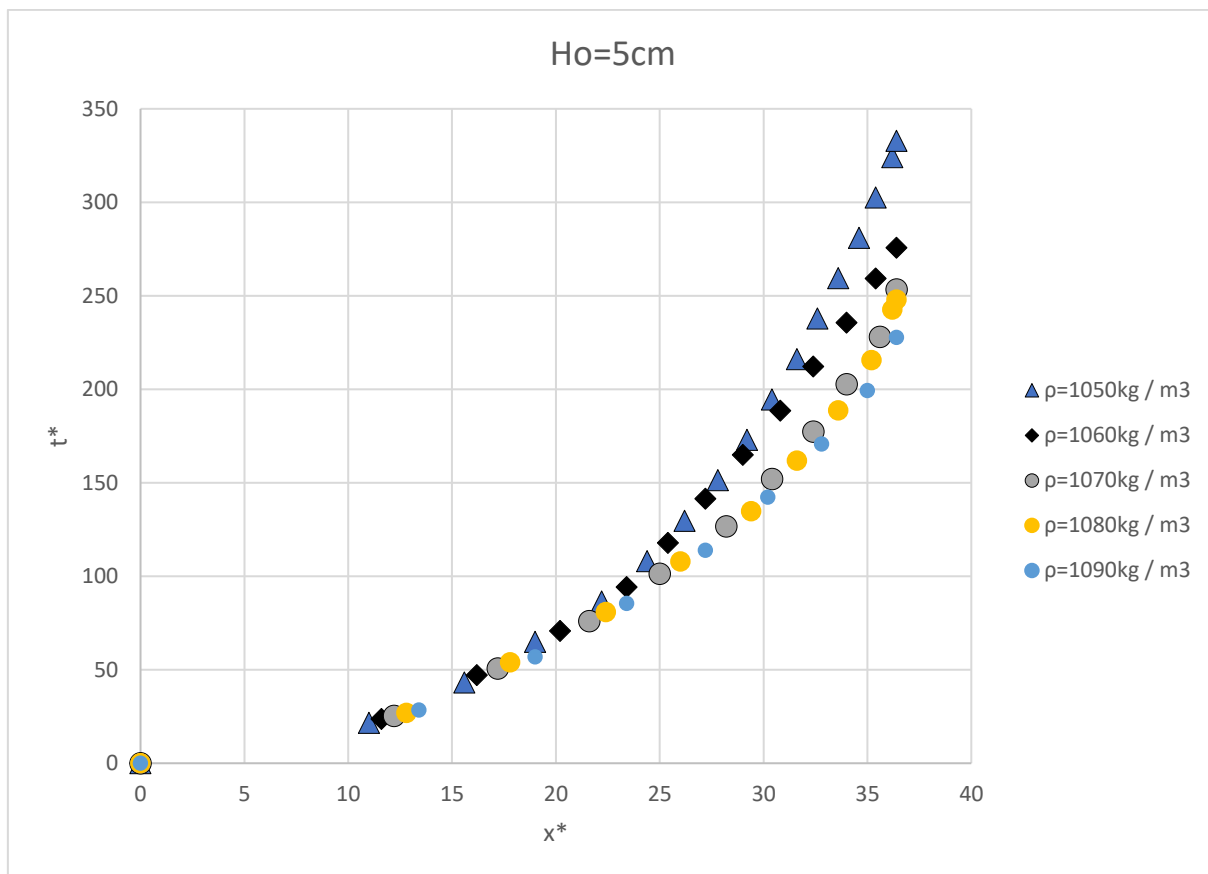
Στο σχήμα 4.2.11 παρατηρείται ότι ρεύμα βαρύτητας με το μεγαλύτερο αρχικό υψόμετρο  $H_o$  κινείται ταχύτερα σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης και στις δύο περιπτώσεις το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας κινείται ταχύτερα.

### 4.3 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα σύνθετης και τραπεζοειδούς διατομής

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αδιάστατα διαγράμματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις των πειραμάτων για το κάθε διαφορετικό αρχικό υψόμετρο και της διαφορετικής κάθε φορά ζητούμενης διαφοράς πυκνότητας. Η απόσταση  $x$  (η οριζόντια απόσταση από το θυρόφραγμα που χωρίζει τα δύο ρεζερβουάρ μέχρι το πέρας της δεξαμενής) γίνεται αδιάστατη μέσω του τύπου  $x^* = x/H$  όπου  $H$  η αρχική στάθμη νερού και ο χρόνος  $t$  με την παράμετρο:

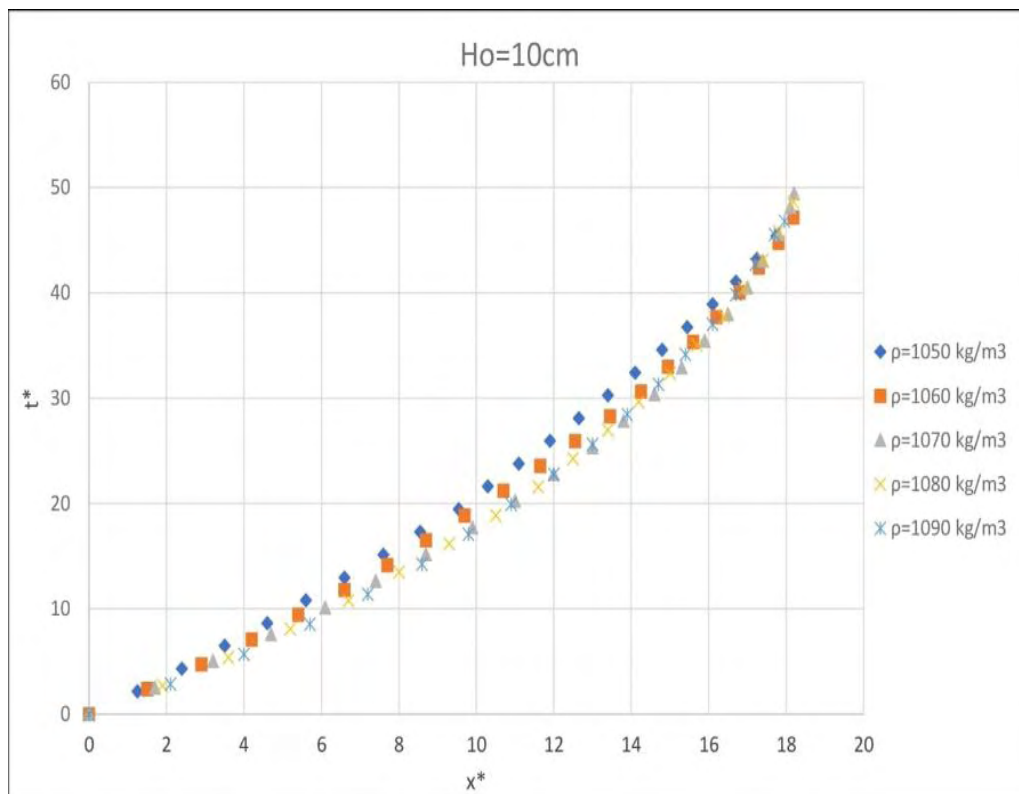
$$\sqrt{\frac{g(1-\gamma)}{H}} \quad \text{και τον τύπο } t^* = t \sqrt{\frac{g(1-\gamma)}{H}}, \quad \text{όπου } \gamma = \frac{P_w}{P_{sw}}$$





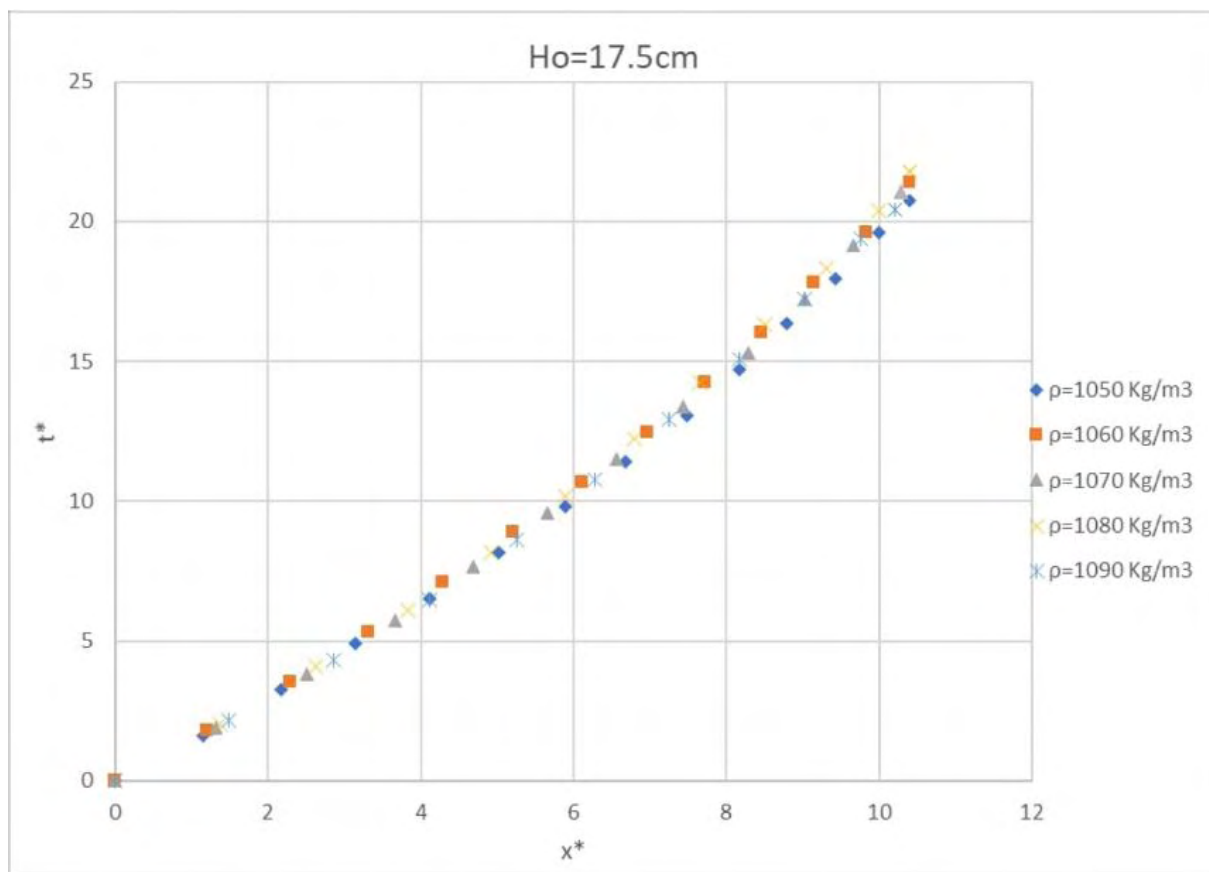
Σχήμα 4.3.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με  $H_0=5\text{cm}$

Στο παραπάνω σχήμα εξετάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος βαρύτητας. Το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας ταξιδεύει ταχύτερα από τα υπόλοιπα.



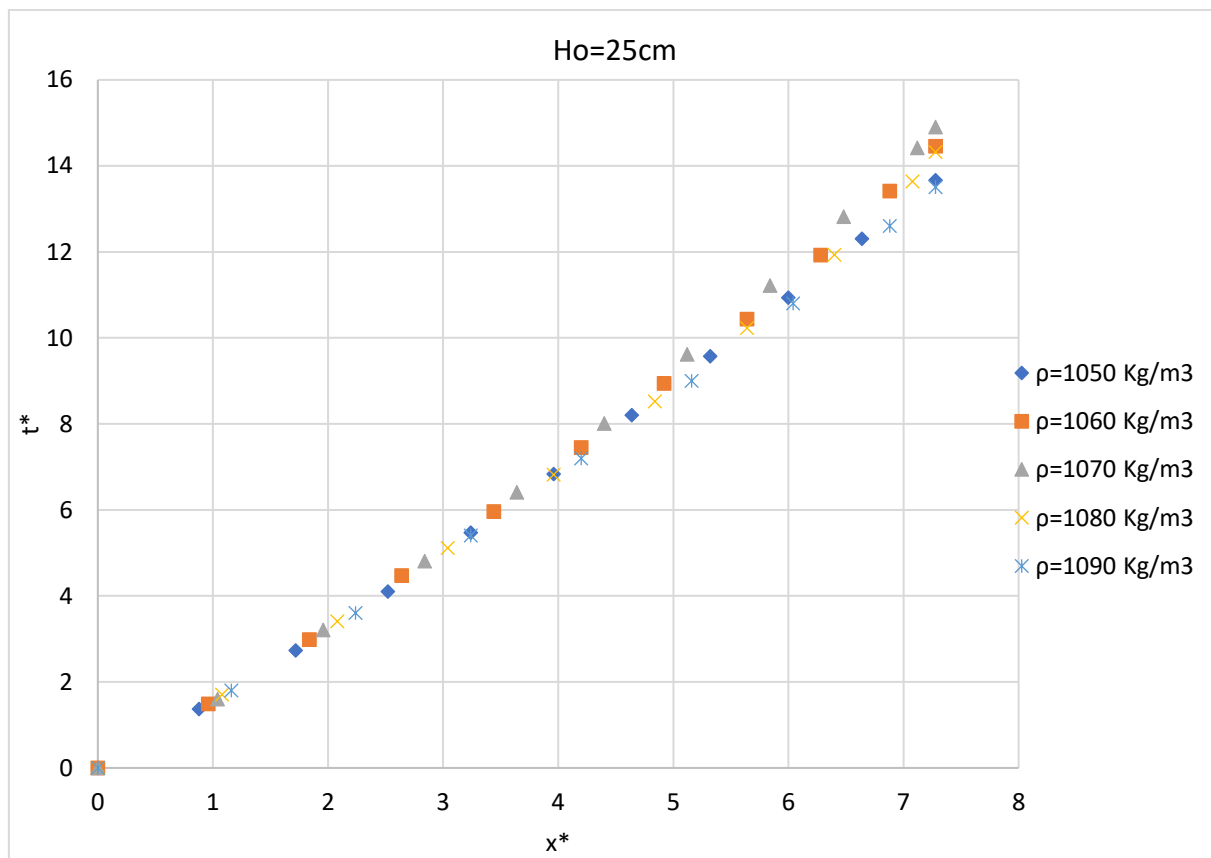
Σχήμα 4.3.2 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με  $H_0=10\text{cm}$

Στο σχήμα 4.3.2 εξετάζεται η κίνηση του ρεύματος βαρύτητας αυτή την φορά με αρχικό υψόμετρο  $H_0=10\text{cm}$ . Παρατηρείται ότι το ρεύμα κινείται προοδευτικά ταχύτερα σε σύγκριση με το αμέσως προηγούμενο αρχικό ύψος  $H_0=5\text{cm}$ . Το ρεύμα βαρύτητας με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας κινείται ταχύτερα όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ( $H_0=5\text{cm}$ ) και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ρεύματος αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της διαφοράς πυκνότητας.



Σχήμα 4.3.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με  $H_0=17.5\text{cm}$

Στο σχήμα 4.3.3 εξετάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος με αρχικό υψόμετρο  $H_0=17.5\text{cm}$ . Παρατηρείται ότι το ρεύμα κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα στην σύνθετη διατομή, καθώς ο αδιάστατος χρόνος  $t^*$  είναι μικρότερος σε σχέση με την τραπεζοειδή διατομή. Σε αυτή την περίπτωση επίσης κινείται ταχύτερα το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας.

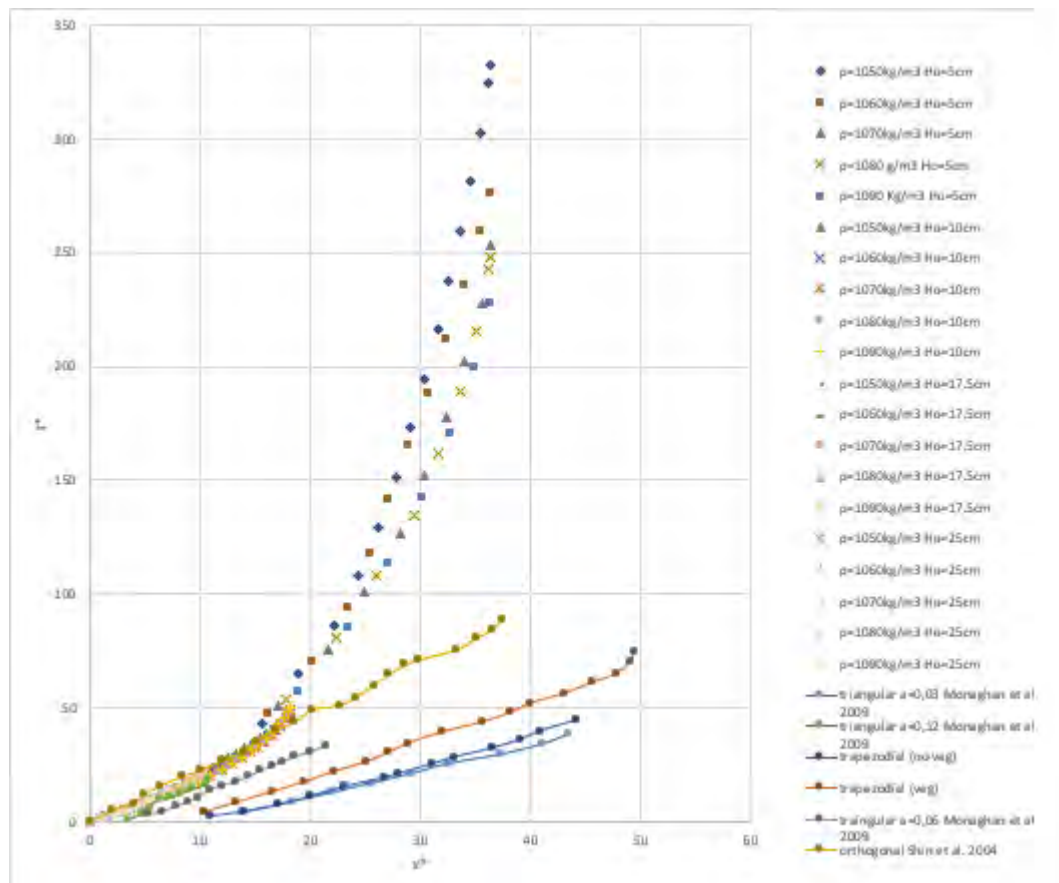


Σχήμα 4.3.4 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με  $H_0=25\text{cm}$

Στο σχήμα 4.3.4 εξετάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο υποκεφάλαιο, το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας κινείται ταχύτερα σε σύγκριση με τα άλλα. Ο αδιάστατος χρόνος είναι μικρότερος και στις δύο περιπτώσεις σε σχέση με την τραπεζοειδή διατομή, όπως επίσης και με το μικρότερο αρχικό υψόμετρο ( $H_0=17.5\text{cm}$ ) της σύνθετης διατομής. Επομένως όσο μεγαλύτερο είναι το αρχικό υψόμετρο αναλόγως αυξάνεται και η ταχύτητα του μετώπου του ρεύματος βαρύτητας.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των πειραμάτων των Monaghan et al. (2009), Κεραμάρης και Πρίνος (2010,2016) και τα αποτελέσματα των

πειραμάτων σε διαφορετικό ύψος αρχικής στάθμης και διαφορετικής πυκνότητας. Επίσης περιλαμβάνεται η χρονική ανάπτυξη του μετώπου του ρεύματος από τα πειράματα των Shin et al. (2004) για οριζόντια ορθογωνική διατομή. Συγκρίνεται η κίνηση του ρεύματος σε διαφορετική λεκάνη, καθώς και πόσο εξαρτάται από την γεωμετρία της.

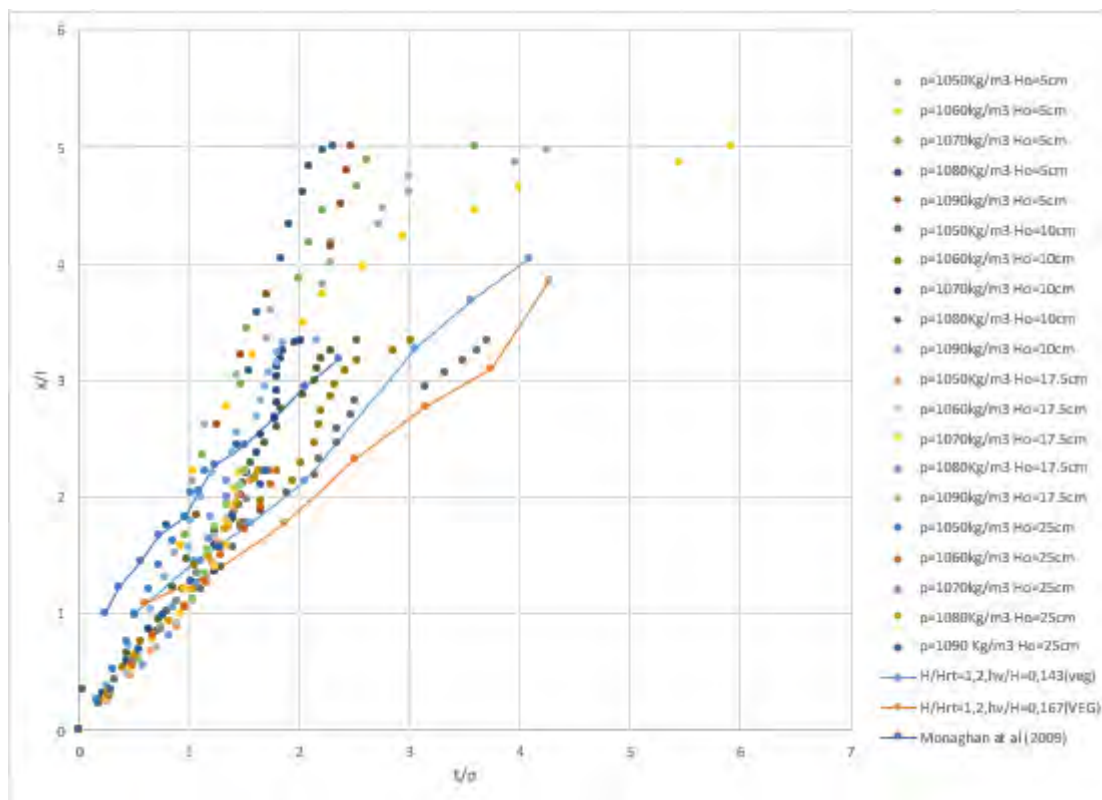


Σχήμα 4.3.5 Συγκριτικό διάγραμμα χρονικής εξέλιξης του μετώπου σε αδιάστατη μορφή

Στο σχήμα 4.3.5 παρουσιάζονται μετρήσεις των Monaghan et al.(2009) για τριγωνικές λεκάνες με κλίσεις ( $12^\circ$ ,  $23^\circ$  και  $41^\circ$ ) ως προς τον οριζόντιο άξονα, όπως επίσης και των Shin et al.(2004) για ορθογωνική διατομή, μαζί με τα αποτελέσματα του πειράματος για σύνθετη διατομή με πλευρική κλίση 1: 1. Η επίδραση της γεωμετρίας της λεκάνης, και η απότομη κλίση των πλευρών είναι σημαντικές ως προς την κίνηση του ρεύματος και της ταχύτητας. Από το

διάγραμμα προκύπτει ότι υπάρχει απόκλιση με τα αποτελέσματα των άλλων ερευνητών για το χαμηλότερο αρχικό ύψος 5cm όπου παρατηρείται έντονη μη γραμμικότητα. Τα ρεύματα βαρύτητας με αρχικό υψόμετρο  $H_0=10\text{cm}$ ,  $H_0=17.5\text{cm}$  και  $H_0=25\text{cm}$  κινούνται ταχύτερα σε όλες τις περιπτώσεις σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της έρευνας των Shin et. al. (2004) για την ορθογωνική διατομή. Η ύπαρξη βλάστησης στον πυθμένα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας με την πάροδο του χρόνου. Τα αποτελέσματα της έρευνας των Κεραμάρης και Πρίνος (2010,2016) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του πειράματος σε τραπεζοειδή αποδεικνύουν ότι το ρεύμα βαρύτητας κινείται ταχύτερα σε πυθμένα χωρίς βλάστηση. Τέλος σε όλες τις περιπτώσεις από τα αποτελέσματα της έρευνας των Monaghan et al.(2009) για τριγωνικές λεκάνες με διαφορετικές κλίσεις, το ρεύμα βαρύτητας κινείται ταχύτερα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του πειράματος.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των πειραμάτων Monaghan et al. (2009a,2009b), των Κεραμάρης και Πρίνος (2016), και τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε διαφορετικό αρχικό υψόμετρο με διαφορετική διαφορά πυκνότητας. Τα πειράματα των Monaghan et al.(2009a,2009b) που πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή σχήματος V. Δείχνεται ότι η κίνηση του ρεύματος εξαρτάται από την γεωμετρία της λεκάνης. Η οριζόντια απόσταση  $x$  αδιαστατοποιείται με την παράμετρο  $l$ , και ο χρόνος  $t$  με την παράμετρο  $\sigma$ . Η παράμετρος  $l$  είναι ίση με  $l = \frac{2V}{aw}$ , όπου  $V = L1w \left( H_0 + \frac{1}{2}a \right)$ , όπου  $L1$ (απόσταση μεταξύ θυροφράγματος και πέρατος δεξαμενής),  $w$ (πλάτος ρεύματος),  $H_0$ (ύψος του νερού) και  $a$ (βάθος). Η παράμετρος  $\sigma$  είναι ίση με  $\sigma = \frac{1}{Fr} \sqrt{\frac{2}{ag'}}$ , όπου  $Fr = \frac{U}{\sqrt{h*g'}}$  ( $U$ =ταχύτητα,  $h$ =ύψος του ρεύματος) και  $g' = g \frac{\rho_{sw}-\rho_w}{\rho_{sw}}$ , ( $g=9,81\text{m/s}^2$ ).



Σχήμα 4.3.6 Συγκριτικό διάγραμμα χρονικής εξέλιξης του μετώπου σε αδιάστατη μορφή

Στο σχήμα 4.3.6 παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα των μετρήσεων από τα πειράματα των Monaghan et al. (2009a, 2009b), Κεραμάρης και Πρίνος (2016) καθώς και τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Παρατηρείται μια έντονη μη γραμμικότητα στα 5cm και 10cm η οποία δεν έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του Monaghan et al.(2009a, 2009b) και των Κεραμάρης και Πρίνος (2016). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μέτωπο του κύματος στα μικρά ύψη και κυρίως στα 5cm εξασθενεί με την πάροδο του χρόνου σε μεγάλο βαθμό. Στα μεγαλύτερα ύψη τα αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Monaghan et al.(2009a, 2009b), Κεραμάρης και Πρίνος (2016) λόγω της μεικτής διατομής και του αρχικού ύψους έχει εξαλείψει η μη γραμμικότητα και οι έντονες κλίσεις στο διάγραμμα, με αποτέλεσμα το μέτωπο να διατηρείται σχετικά σταθερό με την πάροδο του χρόνου.

## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η επίδραση της βλάστησης στην κίνηση ρευμάτων βαρύτητας με μεγάλη διαφορά πυκνότητας, σε δεξαμενή που διαχωρίζεται σε δύο ρεζερβουάρ με μετακινούμενη θυρίδα. Η δεξαμενή είναι σύνθετη, τραπεζοειδής στο κατώτερο τμήμα και ορθογωνική στο ανώτερο τμήμα. Η μετακινούμενη θυρίδα διαχωρίζει τα δύο υγρά (καθαρό νερό και αλατόνερο. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με διαφορά πυκνότητας καθαρού νερού και αλατόνερου 50‰ 60‰ 70‰ 80‰ και 90‰ ( $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{sw}=1050, 1060, 1070, 1080, 1090 \text{ kg/m}^3$ ).

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα πειράματα είναι ότι η γεωμετρία της λεκάνης είναι σημαντικός παράγοντας στην διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας. Η παρουσία τραπεζίου στο κάτω μέρος της σύνθετης διατομής έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας των ρευμάτων βαρύτητας σε σχέση με την ορθογωνική διατομή που υπάρχει στο άνω τμήμα της δεξαμενής. Όπως προέκυψε από την σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών, για κίνηση ρευμάτων σε ορθογωνική διατομή των Shin et al.(2004).

Το ρεύμα ταχύτητας είναι παραβολικού τύπου. Το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας ( $\Delta\rho=0,9\%$ ) κινείται ταχύτερα και στις δύο περιπτώσεις τραπεζοειδή διατομή και σύνθετη διατομή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ρεύματος βαρύτητας αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της διαφοράς πυκνότητας. Η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην μετάδοση του ρεύματος είναι πιο εμφανής στην σύνθετη διατομή.

Όσο μειώνεται ο λόγος  $h/H_0$  ( $h$ =ύψος βλάστησης,  $H_0$ =ύψος νερού) αυξάνεται η ταχύτητα του ρεύματος βαρύτητας. Επομένως το αρχικό υψόμετρο  $H_0$  είναι σημαντικός παράγοντας στην διάδοση του ρεύματος βαρύτητας, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις το ρεύμα βαρύτητας με την μεγαλύτερη αρχική στάθμη κινείται ταχύτερα.



Η ταχύτητα του ρεύματος βαρύτητας σε όλες τις περιπτώσεις μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει βλάστηση στον πυθμένα της δεξαμενής. Η τραχύτητα της βλάστησης και η δύναμη αντίστασης έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση του μετώπου του ρεύματος.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι η διαφορά πυκνότητας του ρευστού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις χρονικές διαφορές στα χαμηλότερα ύψη, καθιστώντας την σημαντικό γνώμονα για την εξάπλωση του κύματος.

Η αδιάστατη οριζόντια απόσταση  $x^*$  απεικονίζεται έναντι του αδιάστατου χρόνου  $t^*$  και στις δύο περιπτώσεις (τραπεζοειδή και σύνθετη διατομή). Οι συγκρίσεις έγιναν με τους Shin et al. (2004) για ορθογωνική διατομή, τους Monaghan et al. (2009a, 2009b) για τριγωνικές λεκάνες σχήματος V, άλλα και τους Κεραμάρη και Πρίνο (2010, 2016) για τραπεζοειδή διατομή. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι, η επίδραση της διατομής στην διάδοση του ρεύματος βαρύτητας είναι σημαντική. Ακόμη, αποτελέσματα από μελέτες των Monaghan et al. (2009a, 2009b) για τριγωνικές λεκάνες δείχνουν την εξάρτηση της κίνησης του ρεύματος από τη γεωμετρία της λεκάνης. Επίσης και στις δύο περιπτώσεις για τριγωνικές λεκάνες αλλά και τραπεζοειδείς λεκάνες το ρεύμα βαρύτητας ταξιδεύει ταχύτερα σε σύγκριση με την ορθογωνική διατομή που μελέτησαν οι Shin et al. (2004). Η μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης του ρεύματος βαρύτητας επιτυγχάνεται σε διατομές με απότομη κλίση, όπως το μοντέλο σχήματος V που μελέτησαν οι Monaghan et al. (2009).

Η αδιάστατη απόσταση  $x/l$  απεικονίζεται έναντι του αδιάστατου χρόνου  $t/\sigma$ . Στις συγκρίσεις που έγιναν με τα αποτελέσματα των Monaghan et al. (2009a, 2009b), αλλά και με τους Κεραμάρη και Πρίνο (2016) αναδεικνύεται ο ρόλος του αρχικού υψομέτρου  $H_0$  για την διατήρηση και το ύψος του μετώπου του κύματος καθιστώντας το σημαντικό παράγοντα για την εξάπλωση του κύματος. Τα αποτελέσματα των για  $H_0=17.5\text{cm}$ ,  $H_0=25\text{cm}$  έρχονται σε

ικανοποιητική συμφωνία με τα πειράματα των Monaghan et al. (2009a, 2009b) και Κεραμάρη και Πρίνο (2016).

## Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία

Antenucci, J. P., J. D. Brooks and M. R. Hipsey (2005). A simple model for quantifying cryptospridium transport, dilution and potential risks in reservoirs, J. Am Water Works Assoc. 97, 86-93.

Banyal, A. S. (2013). A mathematical theorem on the onset of stationary convection in couplestress fluid, J. Appl. Fluid Mech. 6(2), 191-196.

Keevil, G. M., J. Peakall, J. Best and K. J. Amos (2006). Flow structure in sinuous submarine channels : velocity and turbulence structure of an experimental channel, Mar.Geol. 229, 241- 257.

Keramaris, E. and P. Prinos (2008). Gravity currents over a vegetated bed, Proc. of International Conference on Fluvial Hydraulics, RiverFlow 1, 305-310, Cesme-Izmir, Turkey.

Keramaris E and Prinos P., (2009), Lock-exchange experiments: effect of vegetation drag on gravity currents in “33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment”.

Keramaris, E. and Prinos P. (2010). Gravity Currents in a Valley of Trapezoidal Shape, Proc. of International Conference on Fluvial Hydraulics, RiverFlow 599-604, Braunschweig, Germany.

Keramaris, E. and Prinos P. (2016). Gravity Currents in a Vegetated Valley of Trapezoidal Shape, Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 9, No. 3, pp. 1051-1056.

Keramaris, E. (2017). The influence of different types of permeable bed (flexible vegetation and inflexible vegetation rod bundle) in gravity currents. *Special Topics & Reviews in Porous Media — An International Journal*, 8(2):159–166 (2017).

G. H. Keulegan, “Ninth progress report on model laws for density currents. An example of density current flow in permeable media,” *Natl. Bur. Stand. Rep.* 3411, U.S. Dep. of Commerce, Washington, D.C., 1954.

Kumar, P. (2012). Thermosolutal magneto-rotatory convection in couple-stress fluid through porous medium, *J. Appl. Fluid Mech.* 5(4), 45-52.

Monaghan, J. J., C. A. Meriaux, H. E. Huppert and J. Mansour (2009). Particulate gravity currents along V-shaped valleys, *J. Fluid Mech.* 631, 419-440.

Monaghan, J. J., C. A. Meriaux, H. E. Huppert and J. M. Monaghan (2009). High Reynolds number gravity currents along V-shaped valleys. *European Journal of Mechanics B/Fluids* 28, 651-659

Oldham, C. E. and J. J. Sturman (2001). The effect of emergent vegetation on convective flushing in shallow wetlands: Scaling and experiments, *Limnol. Oceanogr.* 46(6), 1486-1493.

Shin, J. O., S. B. Dalziel and P. F. Linden (2004). Gravity currents produced by lock-exchange, *J. Fluid Mech.* 521, 1-34.

Takagi, D. and H. E. Huppert (2007). The effect of confining boundaries on viscous gravity currents, *J. Fluid Mech.* 577, 495-505.

Takagi, D. and H. E. Huppert (2008). Viscous gravity currents inside confining channels and fractures. *Phys. Of Fluids* 20, 023104-1-6.

Tanino Y., Nepf H.M., and Kulis P.S., 2005. Gravity currents in aquatic canopies. *Water Resour. Res.*, 41: 1-9.

Xiaoling Yin, Yong He, Chen Lu, Shiyu Gao, and Qingquan Liu, (2019). Experimental Study on Front Spreading of Lock-Exchange Gravity Current with Long Lock Length. *J. Eng. Mech.*, 2019, 146(1): 04019113.

Zhang, X. and H. M. Nepf (2008). Density-driven exchange flow between open water and an aquatic canopy, *Water Resources Research* 44, 1-12.

Liang Zhao, S.M.ASCE<sup>1</sup>, Zhiguo He, M.ASCE<sup>2</sup>, Yafei Lv<sup>3</sup>, Ying-Tien Lin<sup>4</sup>, Peng Hu<sup>5</sup>, and Thomas Pähtz (2018). Front Velocity and Front Location of Lock-Exchange Gravity Currents Descending a Slope in a Linearly Stratified Environment. *J. Hydraul. Eng.*, 2018, 144(11): 04018068.

Κεραμάρης Ε., Πρίνος Π., Γαλανίδου Α., Κατωγιάννη Μ., (2009). Ρεύματα βαρύτητας σε πυθμένα συστοιχίας ράβδων. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ & ΕΕΔΥΠ. Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλλαγών. 603-610, Βόλος, Ελλάδα.

## Κεφάλαιο 7 Παράρτημα

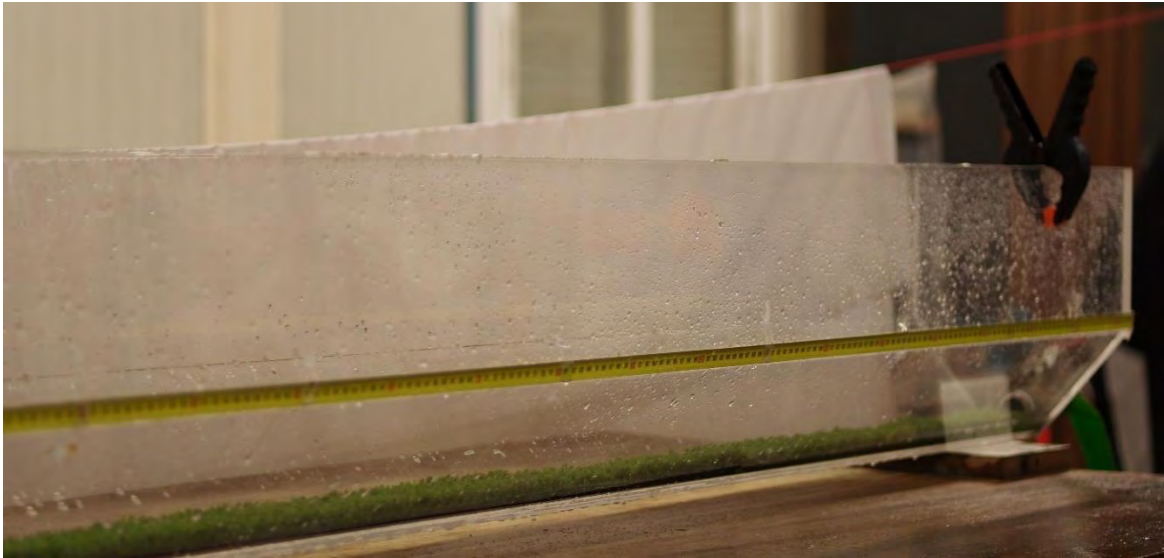
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται εικόνες από την δεξαμενή, με την βλάστηση που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, το θυρόφραγμα, τον δοκιμαστικό σωλήνα όπου παρασκευάστηκαν, η ροδαμίνη που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση του φαινομένου. Στο τέλος παρουσιάζονται στιγμιότυπα για κάθε πείραμα. Το πρώτο αποτυπώνει την αρχή της κίνησης του ρεύματος βαρύτητας, το δεύτερο την κίνηση του ρεύματος στο μέσον της απόστασης και το τρίτο στο πέρας της δεξαμενής.



Εικόνα 7.1 Δεξαμενή από plexiglass 205 εκ. σε μήκος, πλάτους 23εκ. στο άνω και 5εκ. στο κατώτερο μέρος.



Εικόνα 7.2 Προφίλ δεξαμενής με βλάστηση, όπου διαχωρίζεται με θυρόφραγμα σε δύο ρεζερβουάρ.



Εικόνα 7.3 Προφίλ εξόδου δεξαμενής με βλάστηση



Εικόνα 7.4 Προφίλ δεξαμενής από plexiglass μήκους 205cm



Εικόνα 7.5 Θυρόφραγμα ύψους 25cm της σύνθετης διατομής

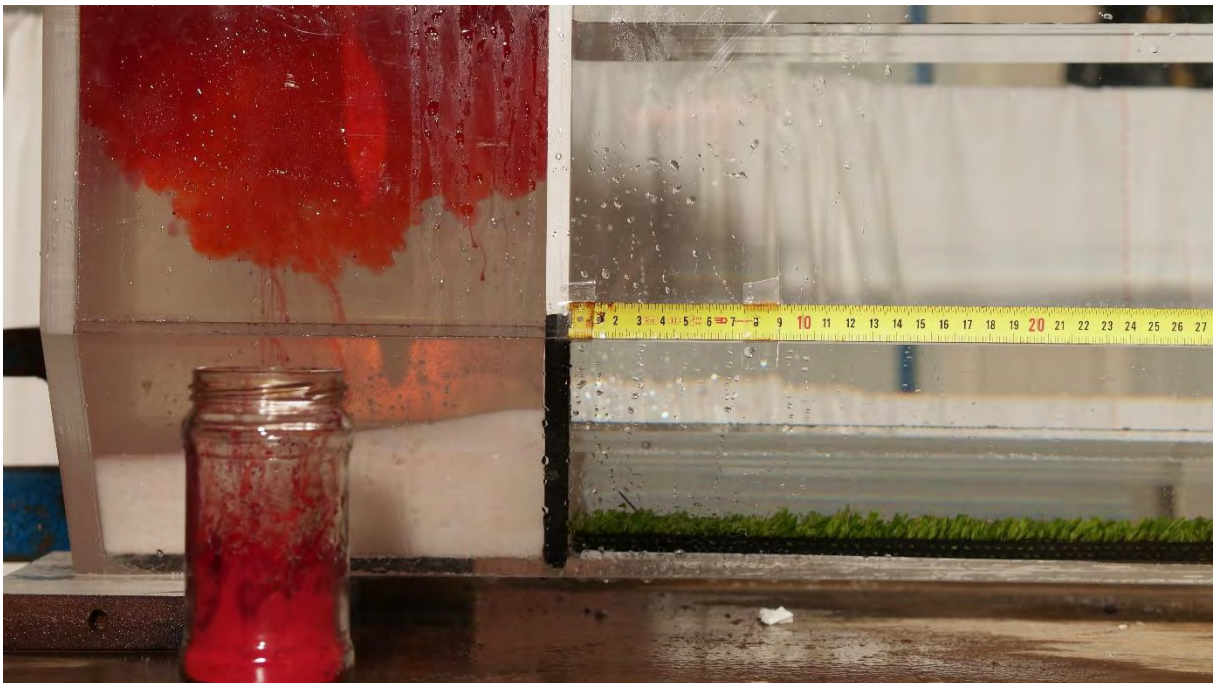




Εικόνα 7.6 Δοκιμαστικός σωλήνας όπου έγινε η επίτευξη των πυκνοτήτων.



Εικόνα 7.7 Ροδαμίνη υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την οπτικοποίηση των ρευμάτων



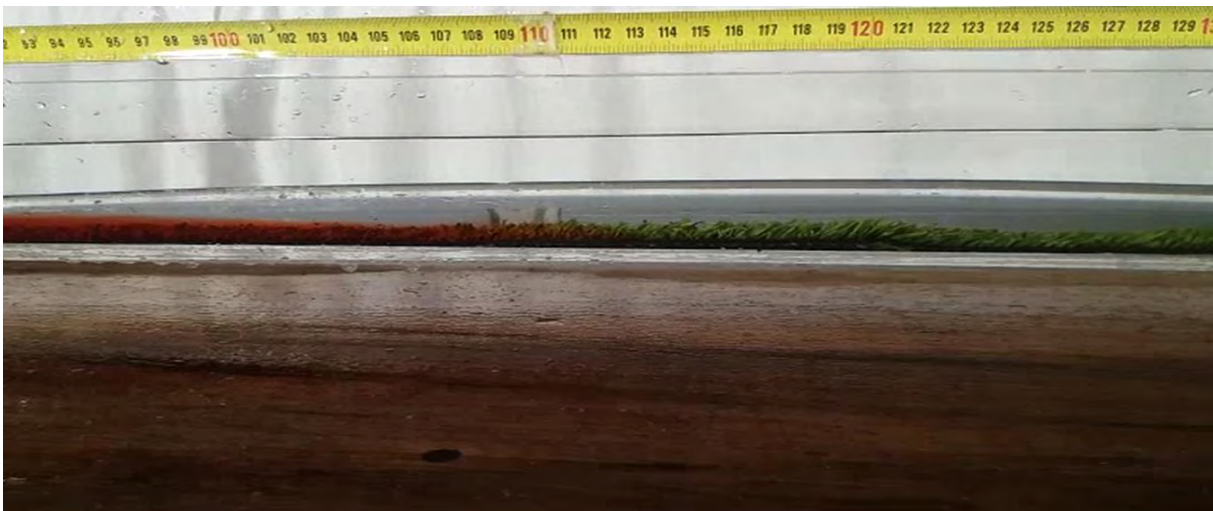
Εικόνα 7.8 Προετοιμασία εκτέλεσης πειράματος  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



- Στην συνέχεια παρατίθενται στιγμιότυπα για το ύψος των 5cm:



Εικόνα 7.9 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{Kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$



Εικόνα 7.10 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$



Εικόνα 7.11 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$



Εικόνα 7.12 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{Kg/m}^3$   $H_0=5\text{cm}$

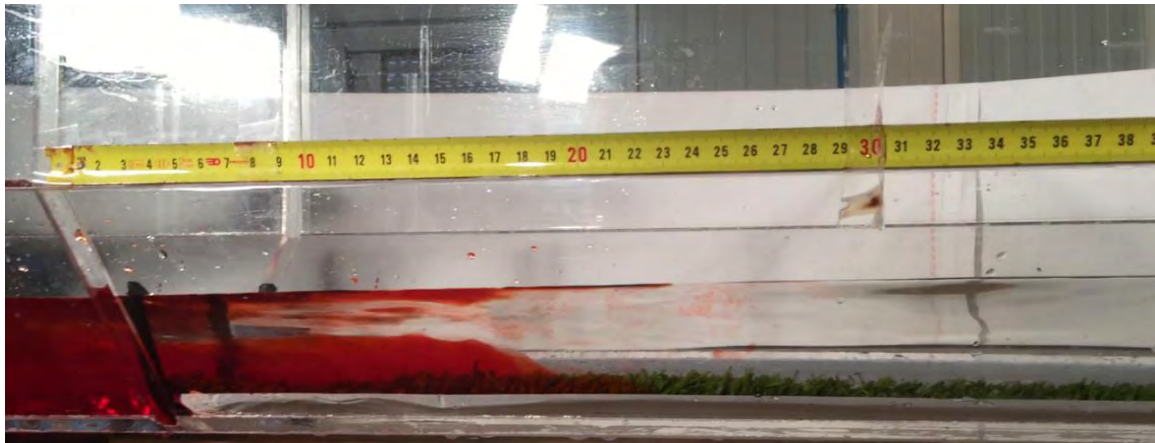


Εικόνα 7.13 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_0=5\text{cm}$



Εικόνα 7.14 Τελος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_0=5\text{cm}$

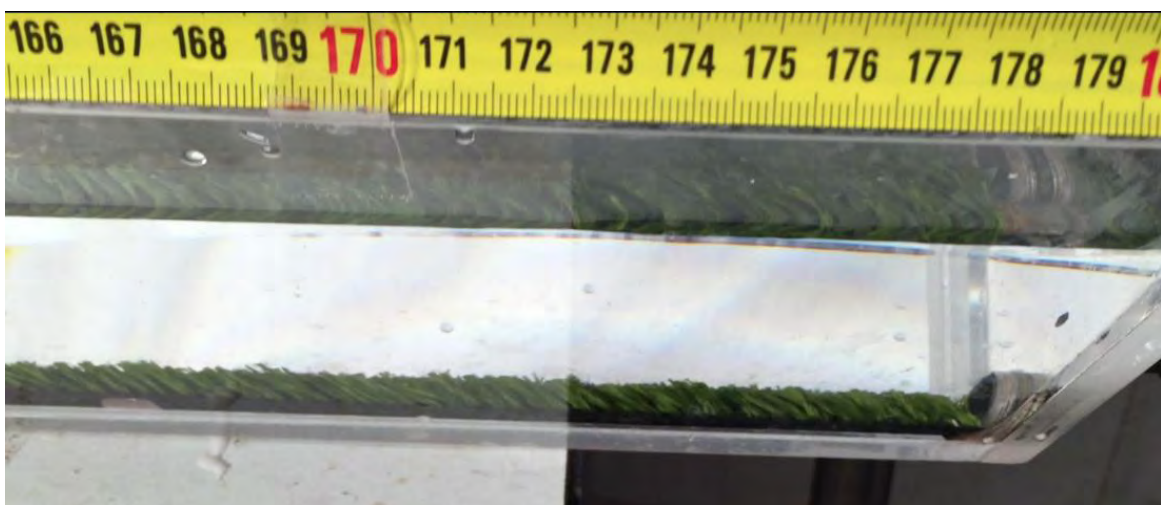




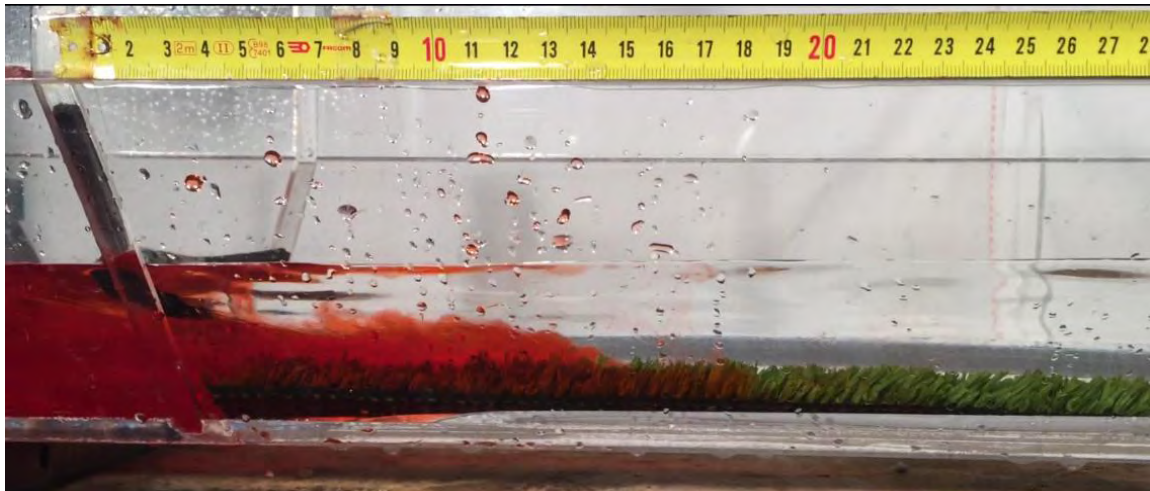
Εικόνα 7.15 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$



Εικόνα 7.16 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$



Εικόνα 7.17 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{Kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$



Εικόνα 7.18 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$



Εικόνα 7.19 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{Kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$



Εικόνα 7.20 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{Kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$





Εικόνα 7.21 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$

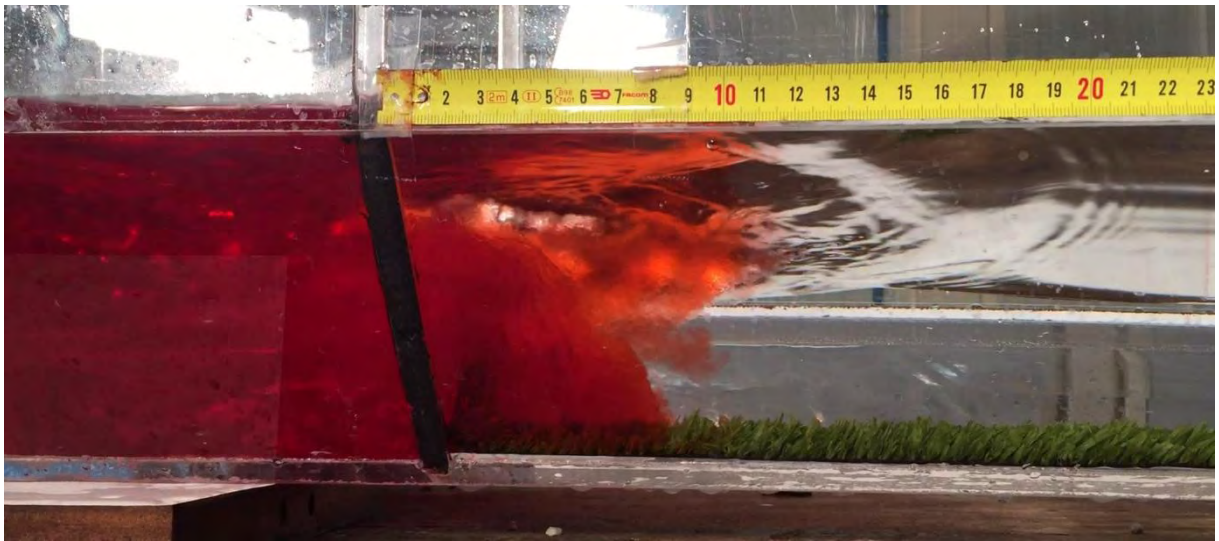


Εικόνα 7.22 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$

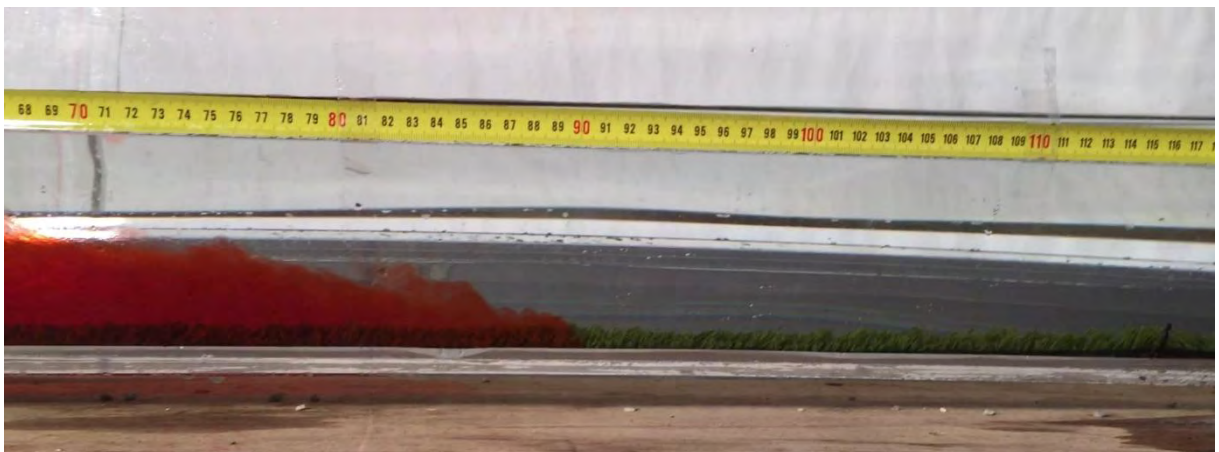


Εικόνα 7.23 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$   $H_o=5\text{cm}$

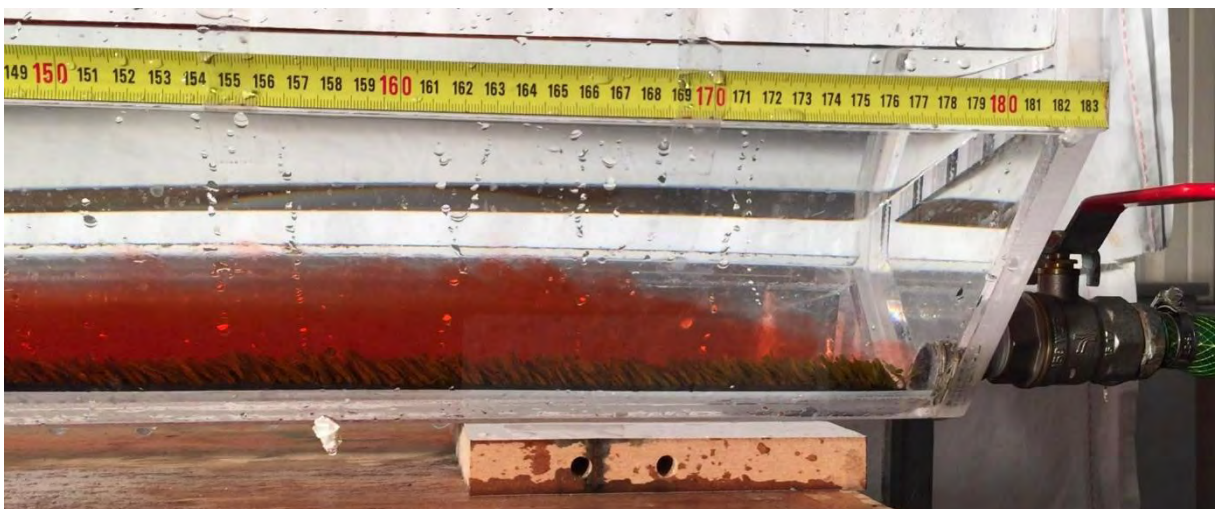
- Στιγμιότυπα για αρχικό υψόμετρο των 10cm:



Εικόνα 7.24 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=10\text{cm}$

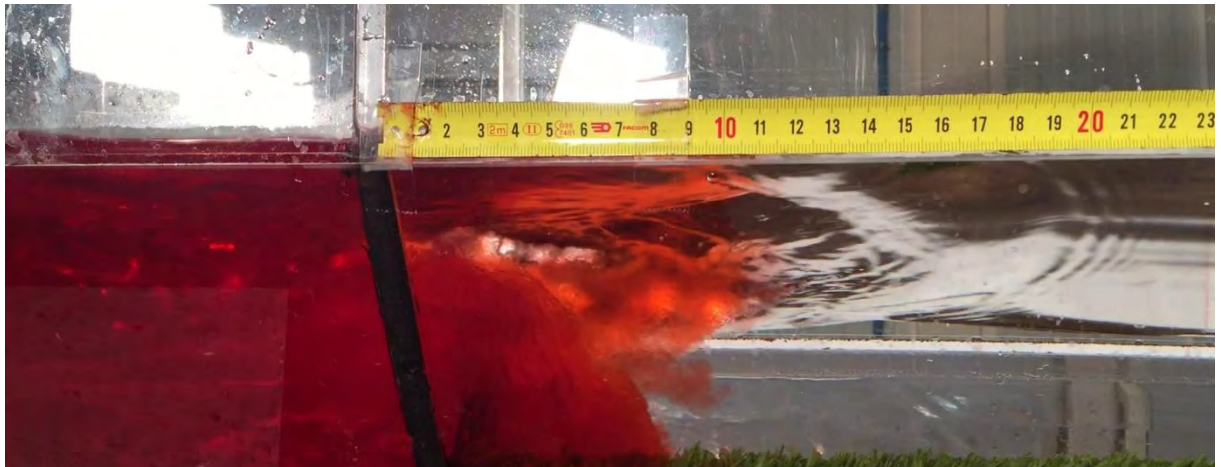


Εικόνα 7.25 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=10\text{cm}$

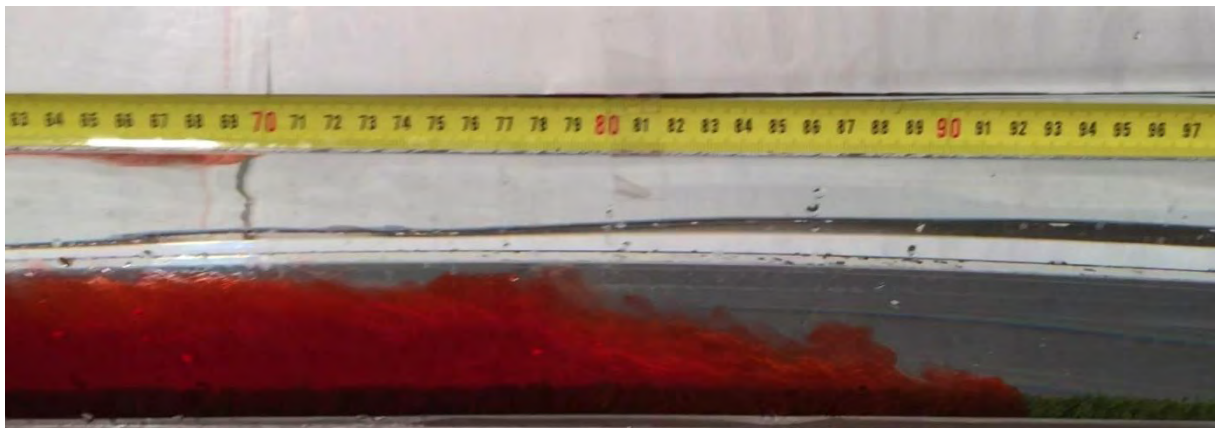


Εικόνα 7.26 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=10\text{cm}$





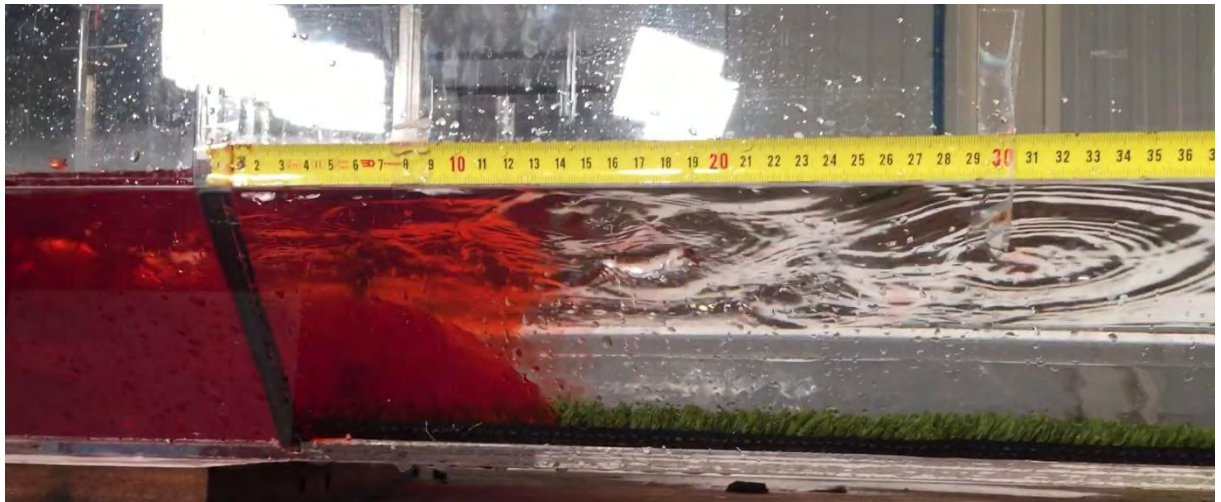
Εικόνα 7.27 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



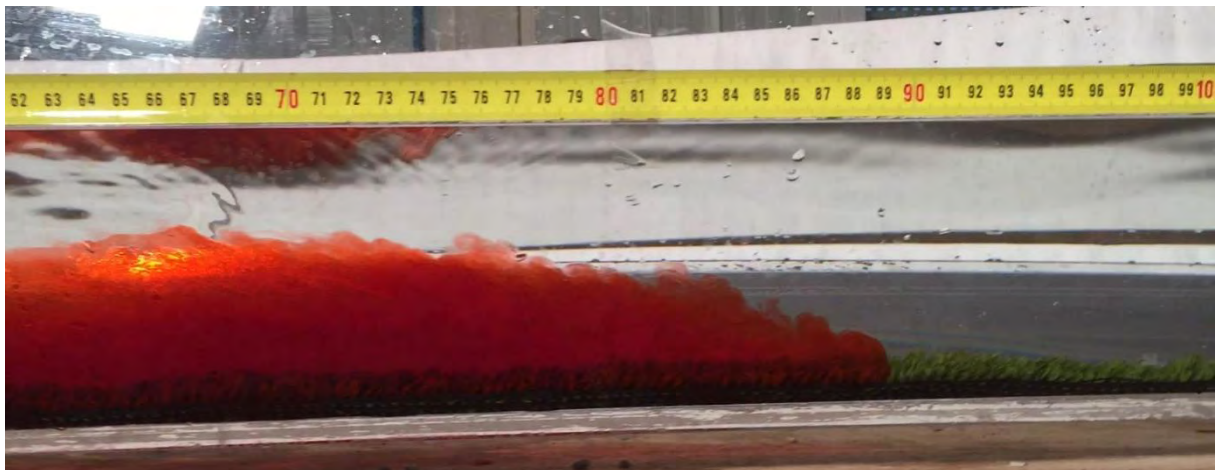
Εικόνα 7.28 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



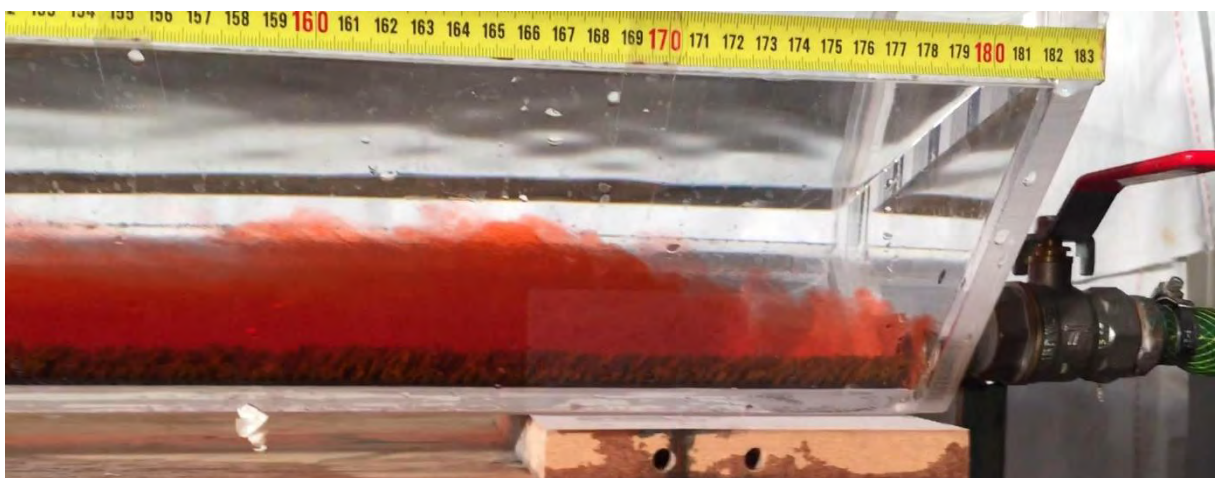
Εικόνα 7.29 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



Εικόνα 7.30 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$

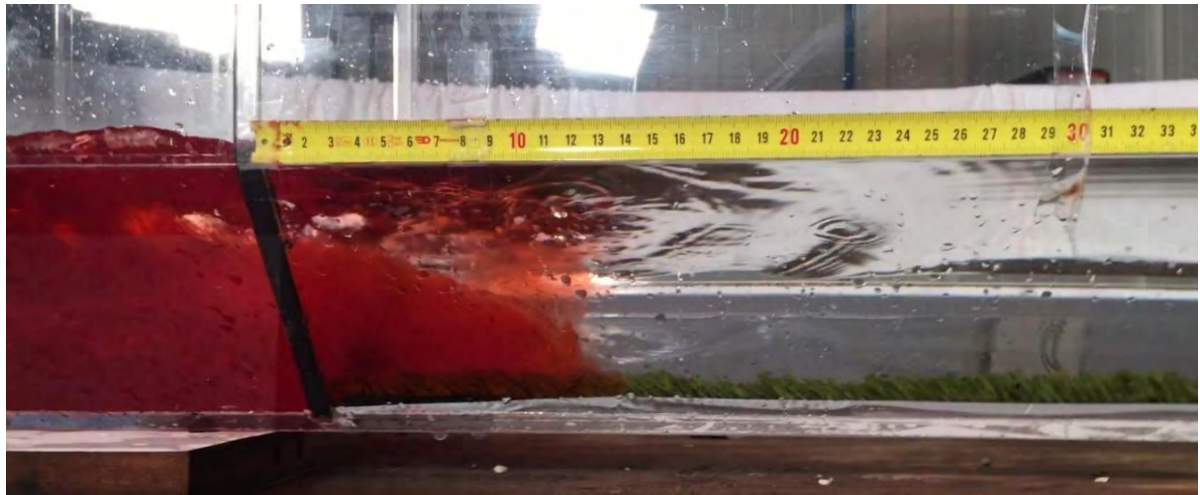


Εικόνα 7.31 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{Kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$

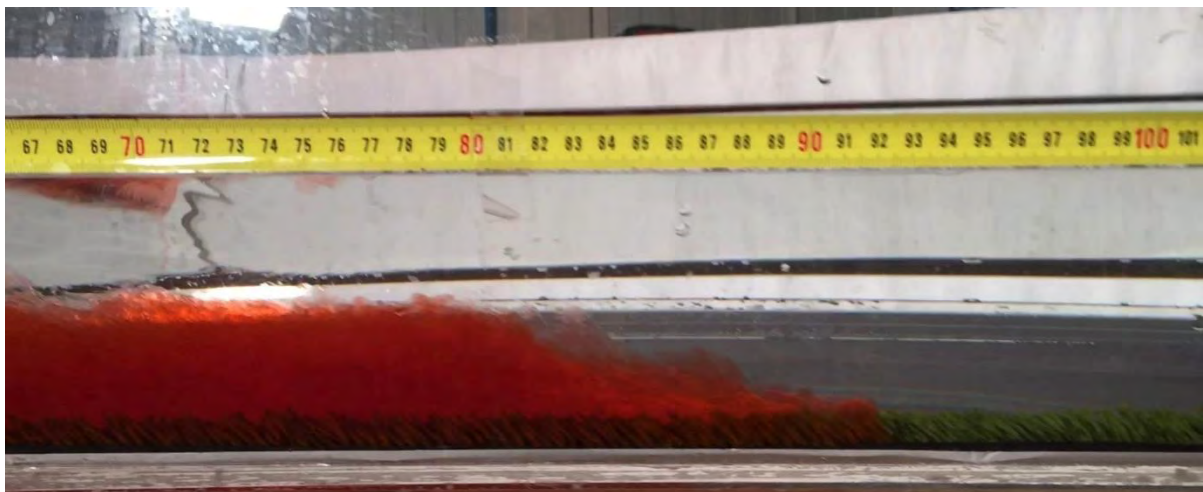


Εικόνα 7.32 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$

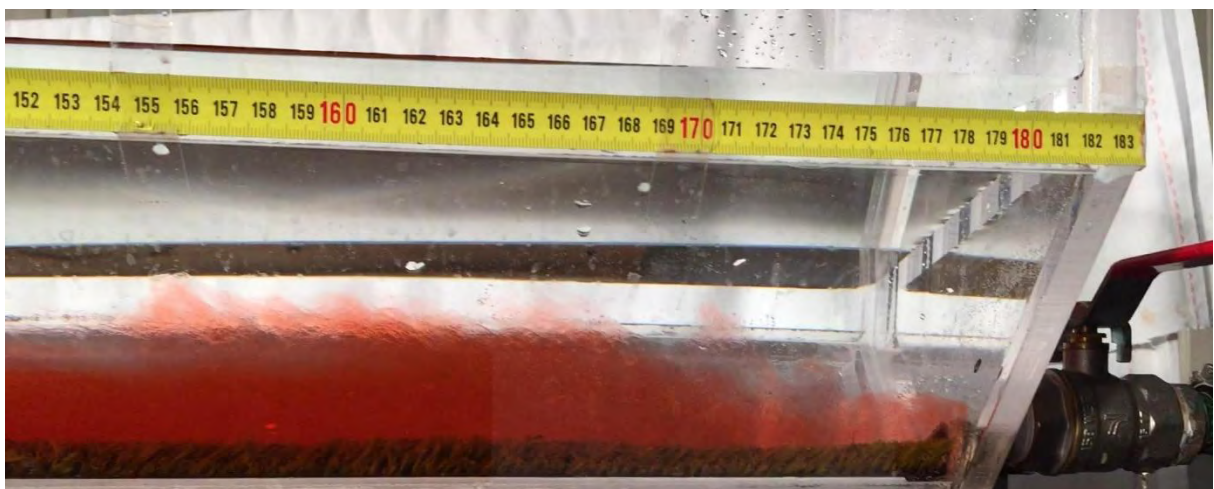




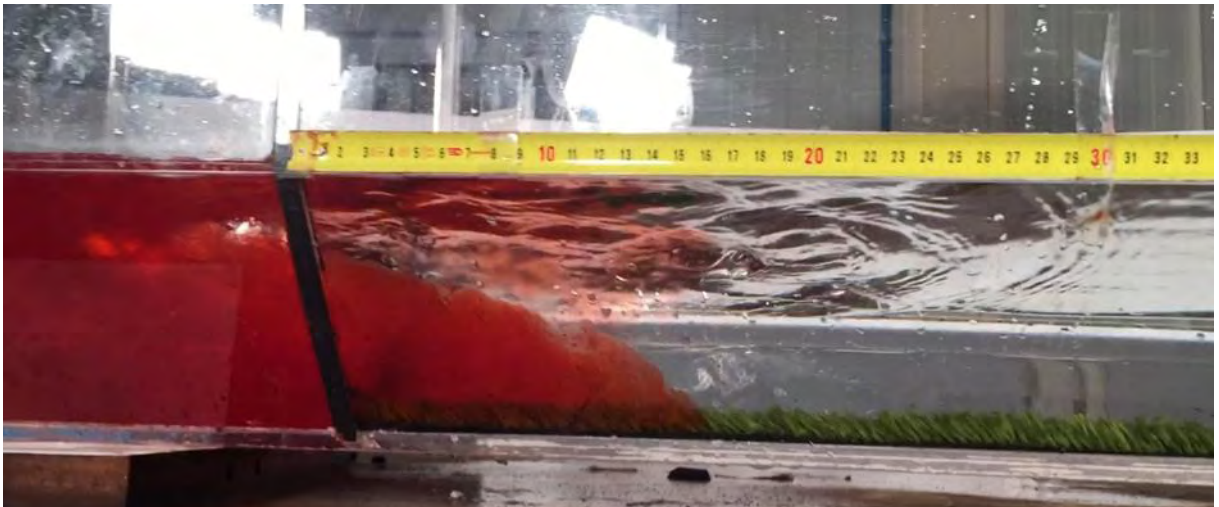
Εικόνα 7.33 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



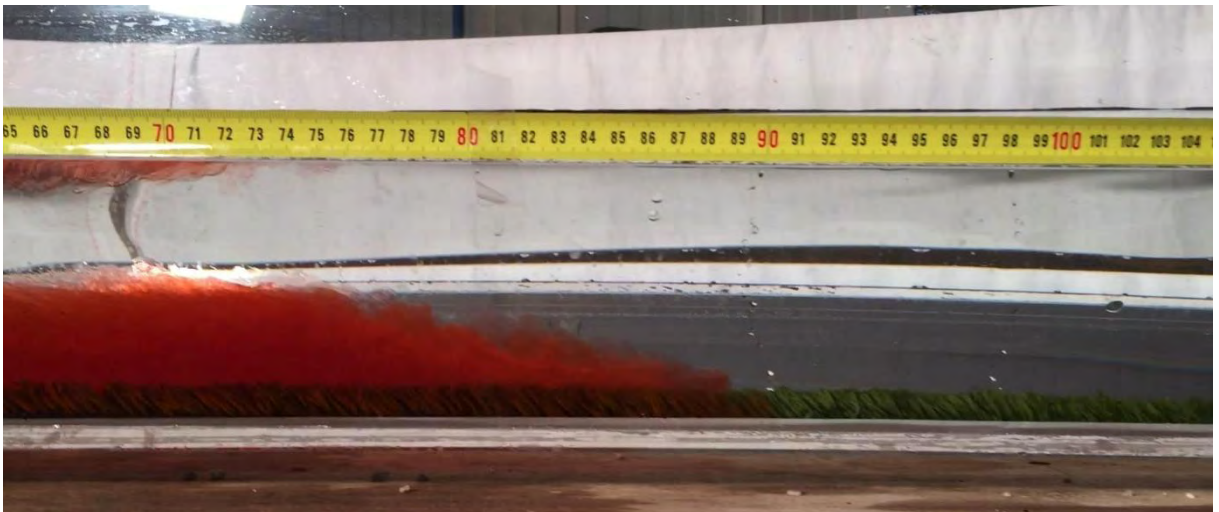
Εικόνα 7.34 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



Εικόνα 7.35 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



Εικόνα 7.36 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{Kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



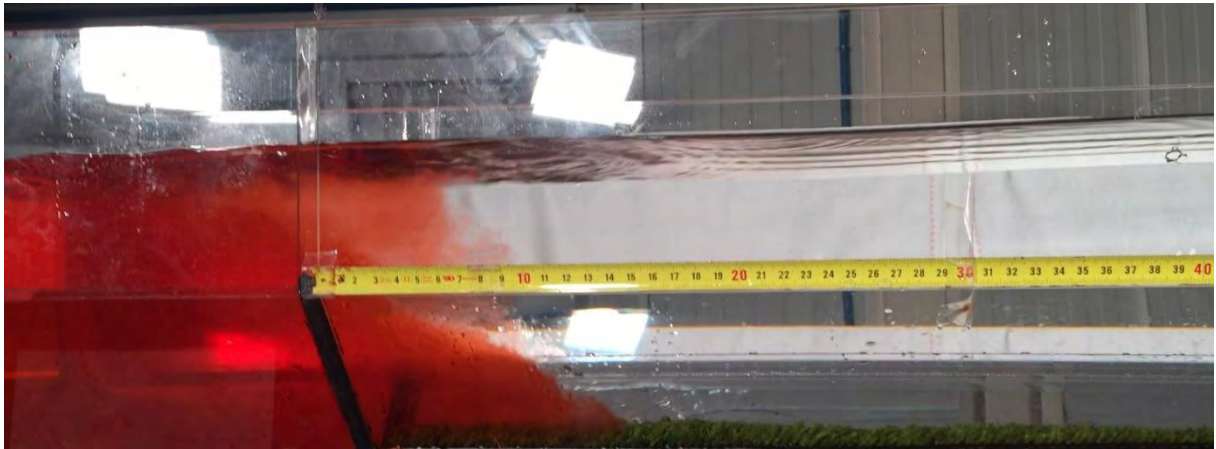
Εικόνα 7.37 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



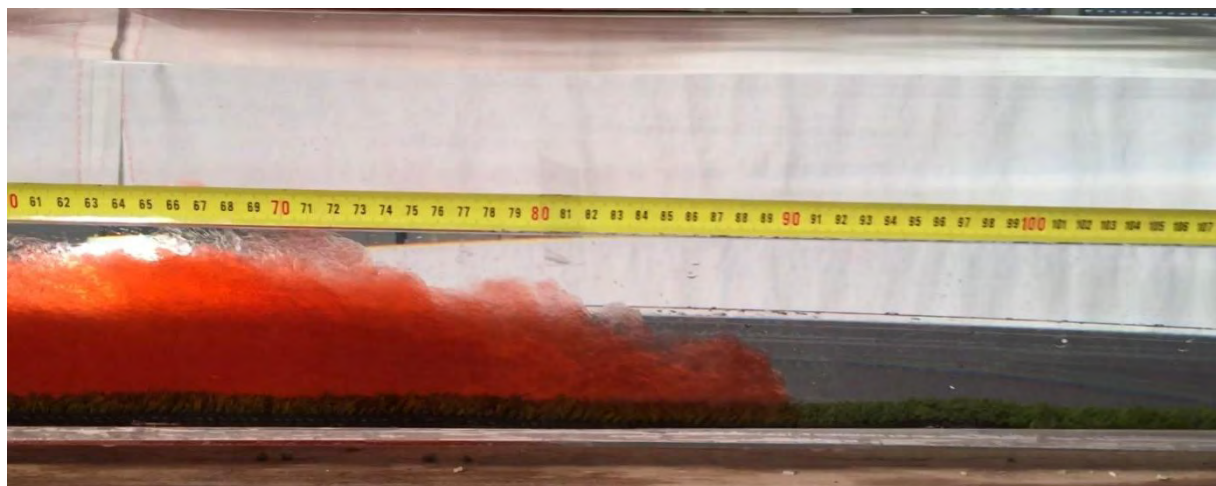
Εικόνα 7.38 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{Kg/m}^3$   $H_o=10\text{cm}$



- Στιγμιότυπα για το αρχικό υψόμετρο  $H_0=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.39 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$



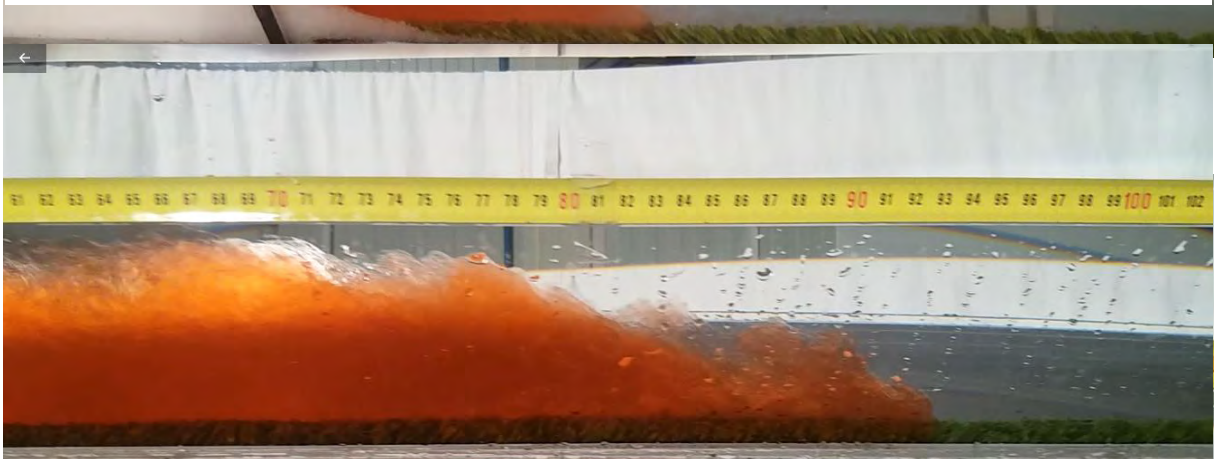
Εικόνα 7.40 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.41 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.42 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_o=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.43 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{Kg/m}^3$   $H_o=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.44 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_o=17.5\text{cm}$





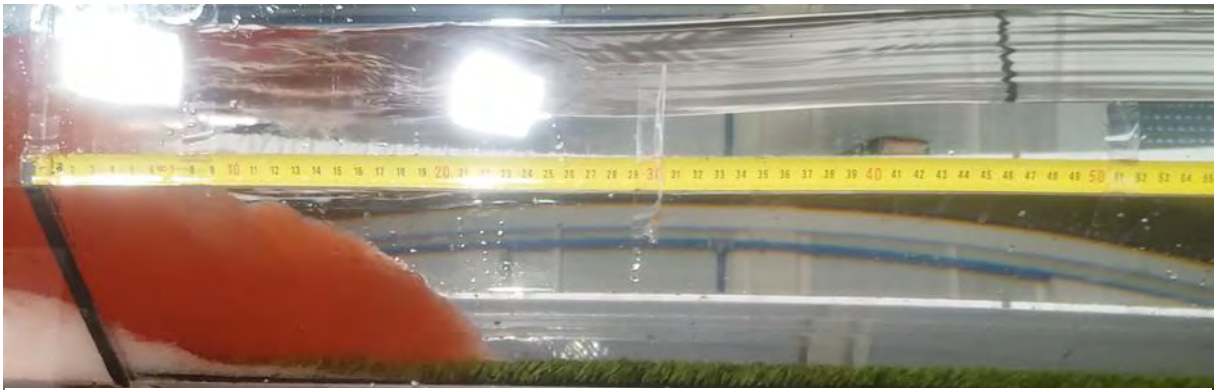
Εικόνα 7.45 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{Kg/m}^3$   $H_o=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.46 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{Kg/m}^3$   $H_o=17.5\text{cm}$



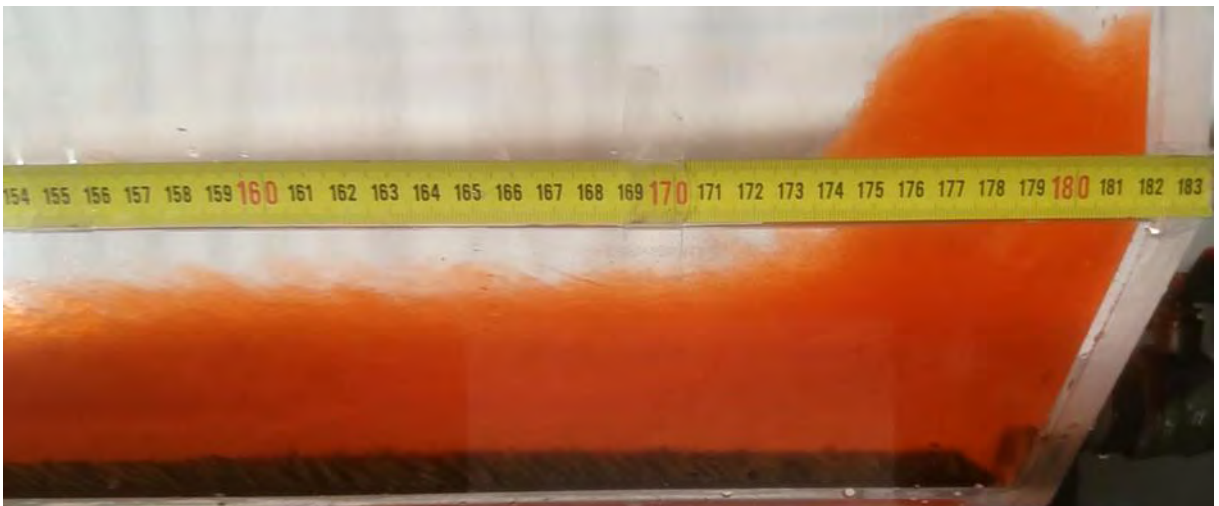
Εικόνα 7.47 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$   $H_o=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.48 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$

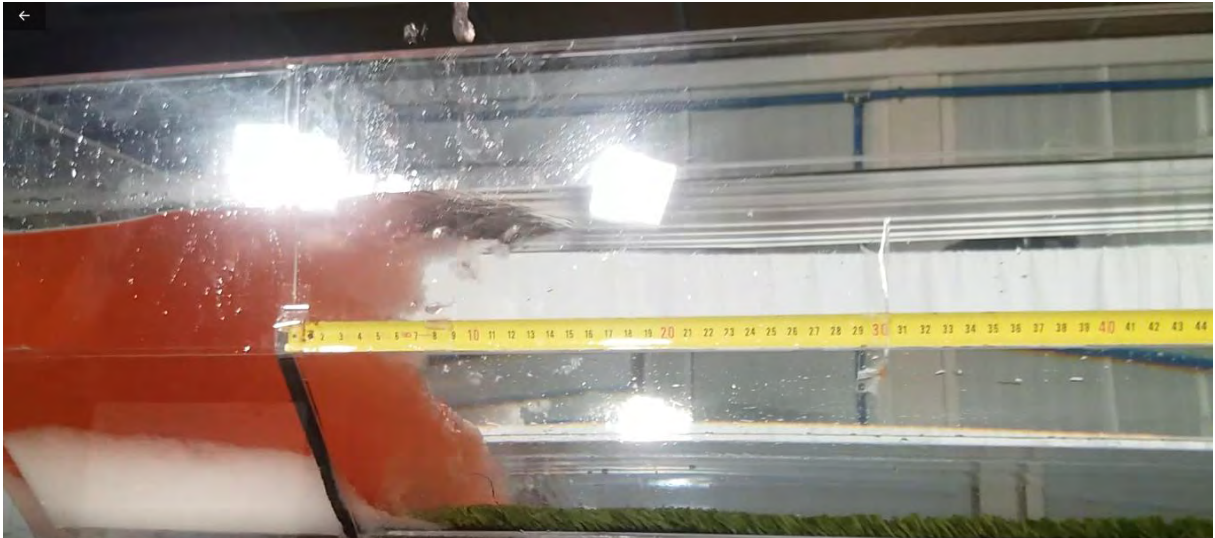


Εικόνα 7.49 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{Kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$

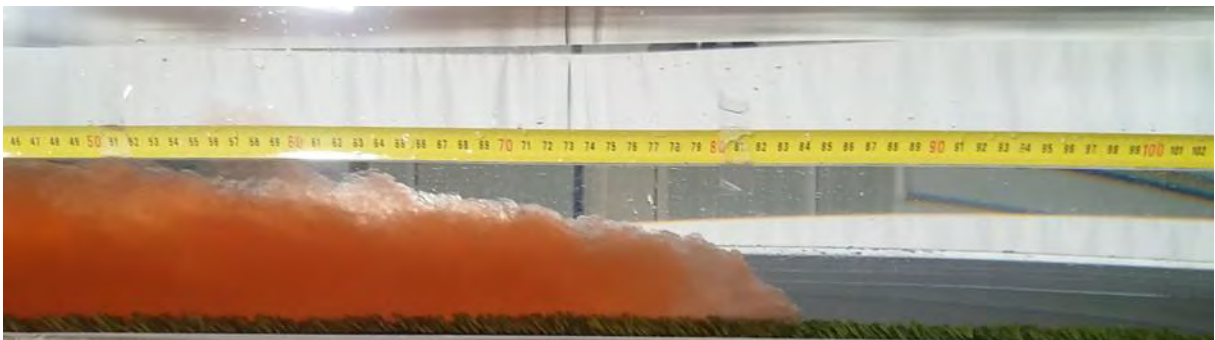


Εικόνα 7.50 τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$

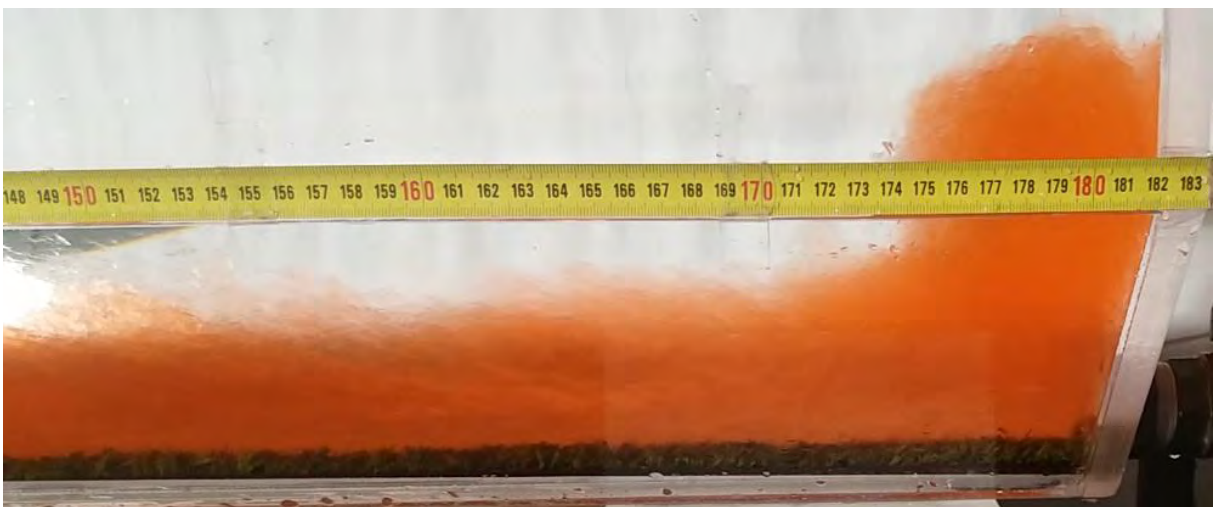




Εικόνα 7.51 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{Kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$

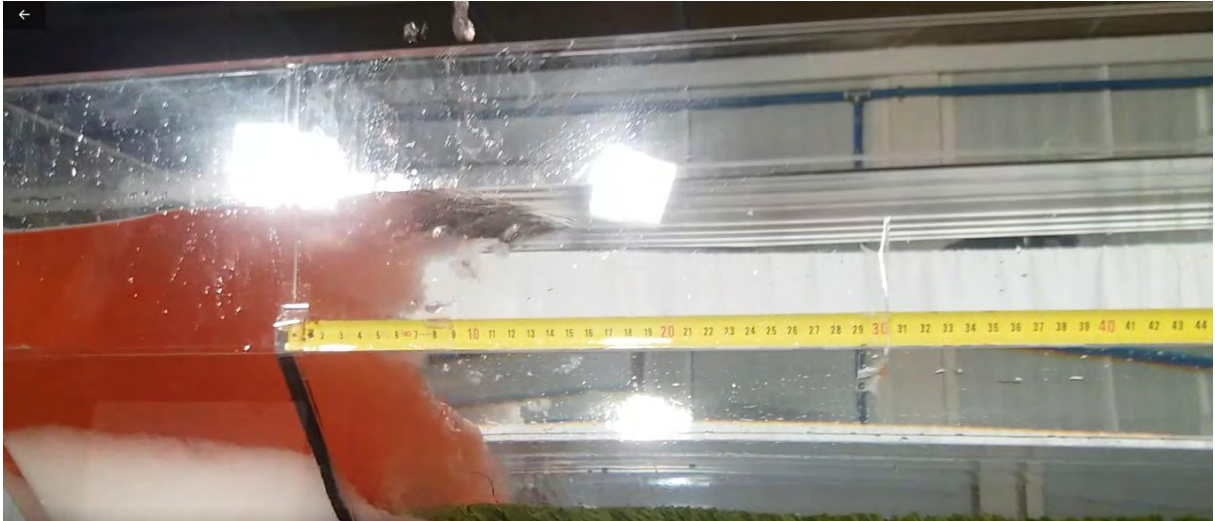


Εικόνα 7.52 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$

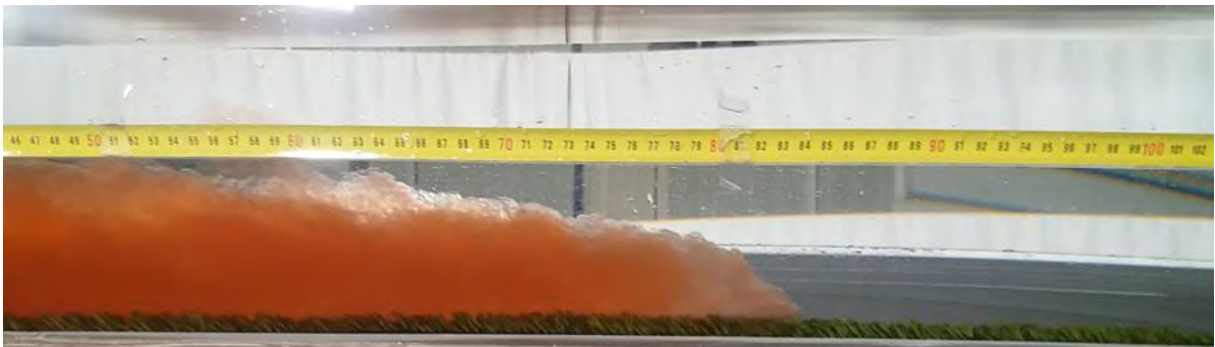


Εικόνα 7.53 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{Kg/m}^3$   $H_0=17.5\text{cm}$

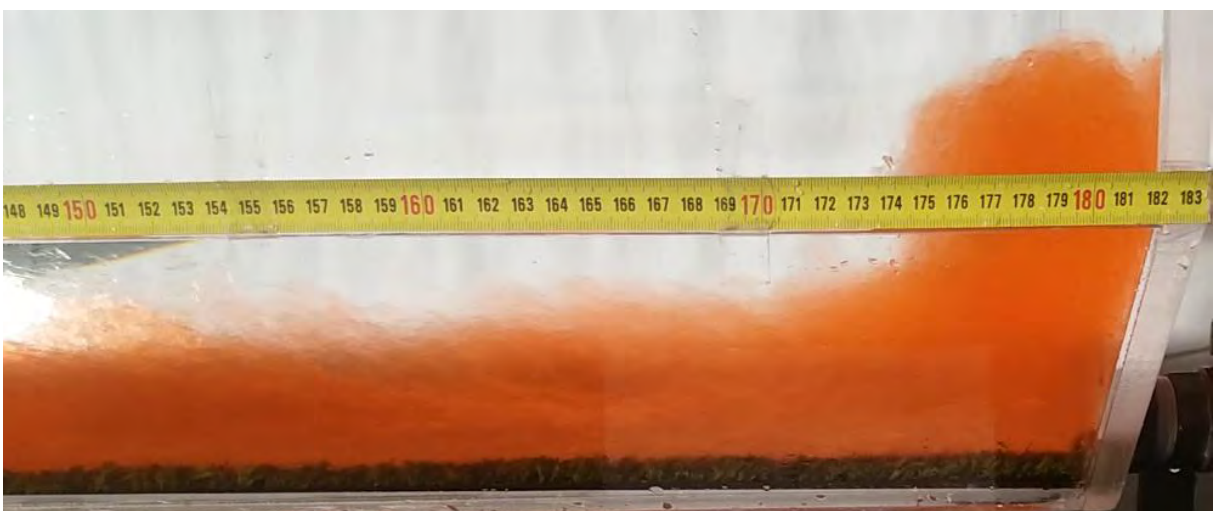
- Στιγμιότυπα για αρχικό υψόμετρο  $H_0=25\text{cm}$



Εικόνα 7.54 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$

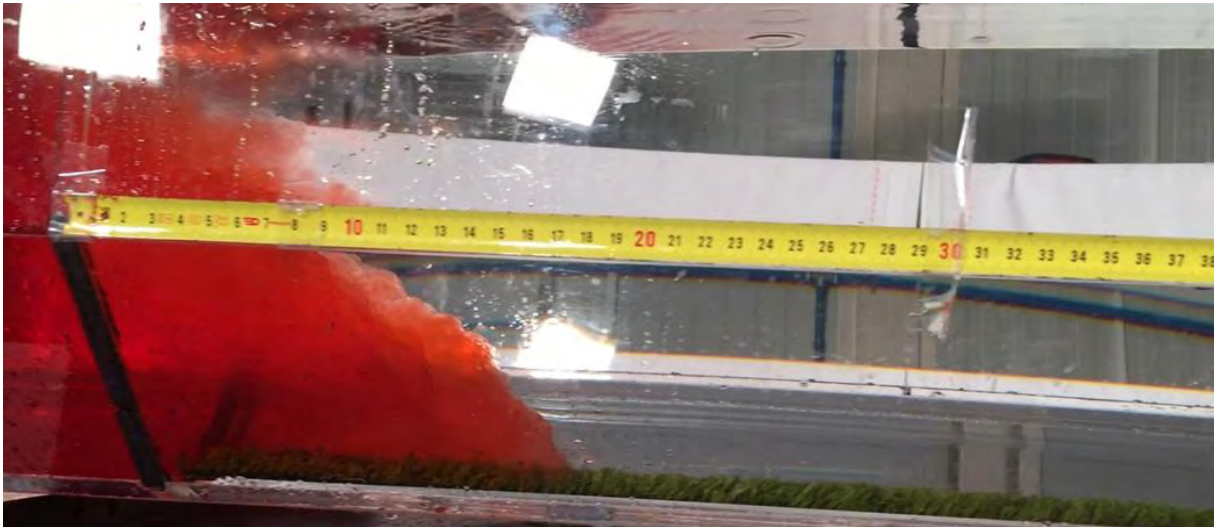


Εικόνα 7.55 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



Εικόνα 7.56 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$

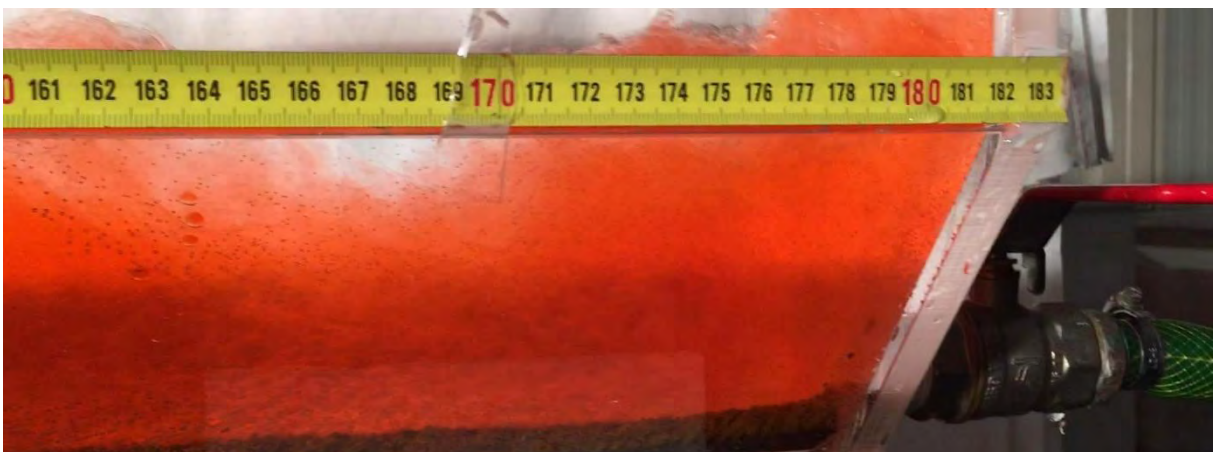




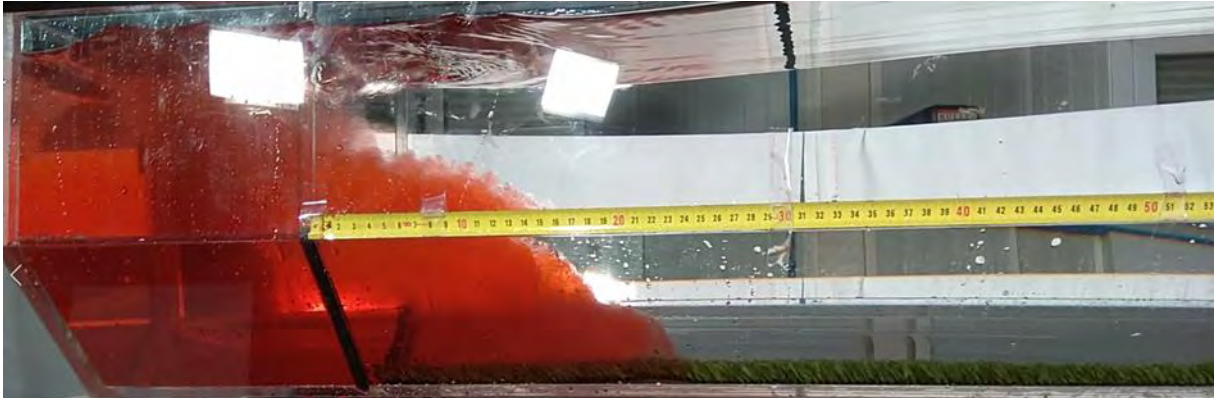
Εικόνα 7.57 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



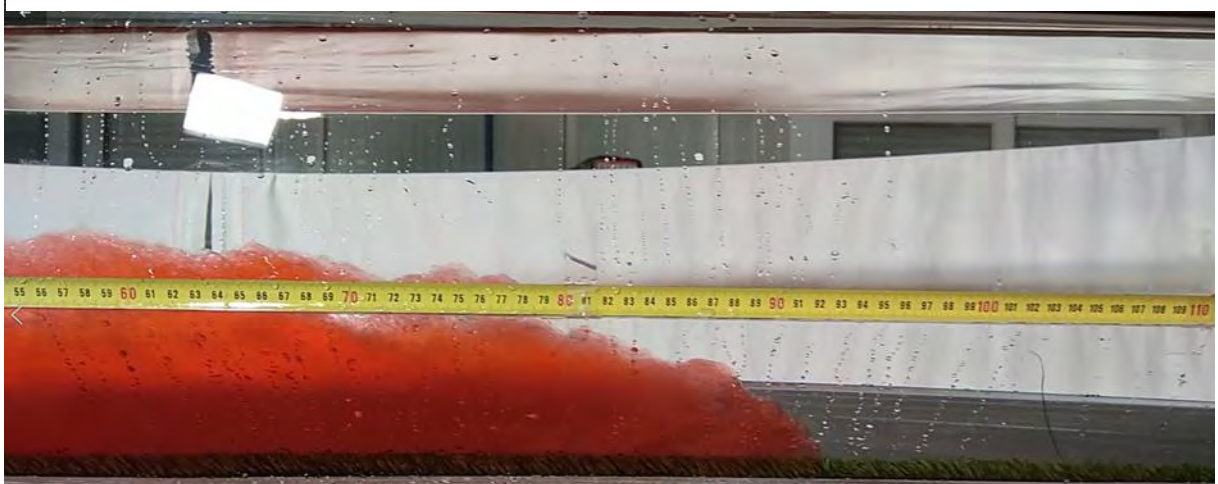
Εικόνα 7.58 Μέση κίνηση ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



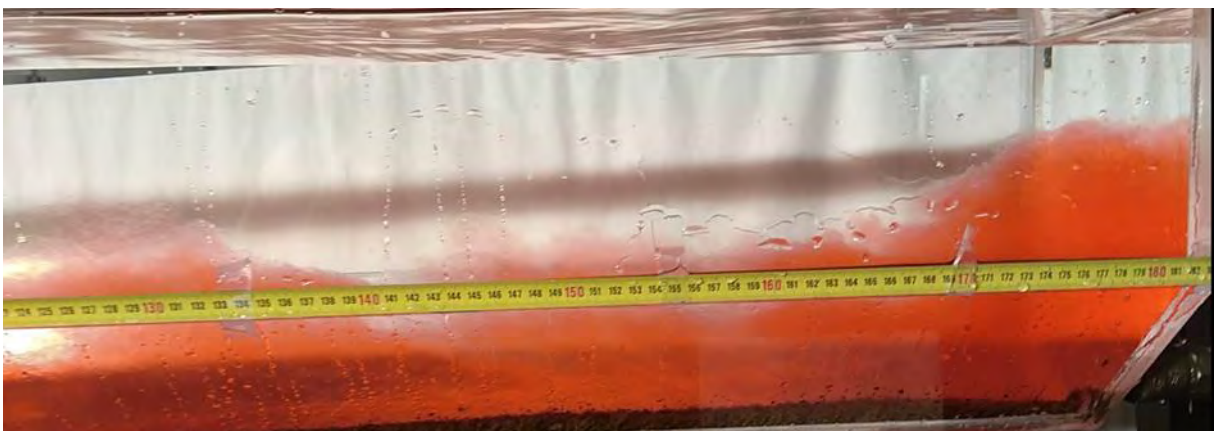
Εικόνα 7.59 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



Εικόνα 7.60 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$

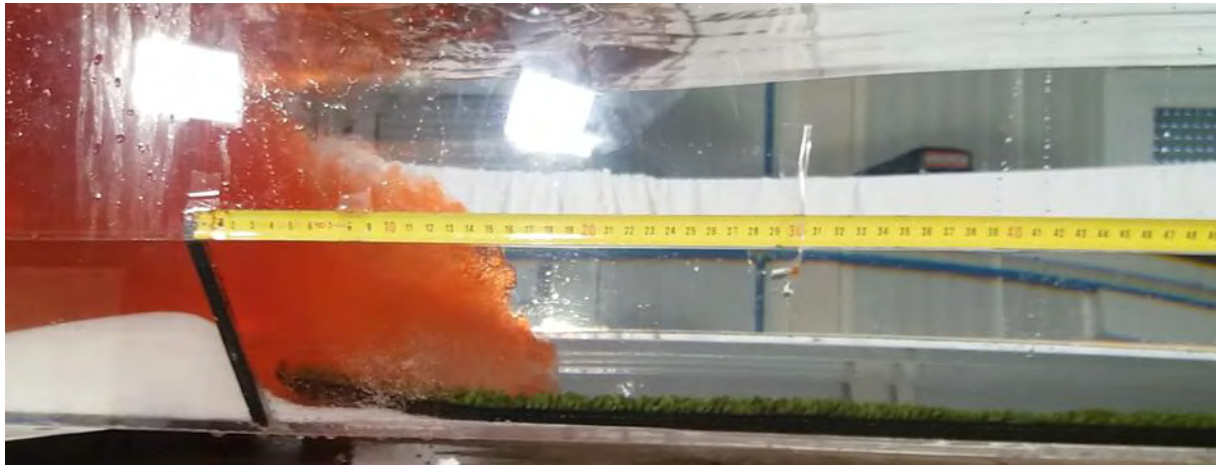


Εικόνα 7.61 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$

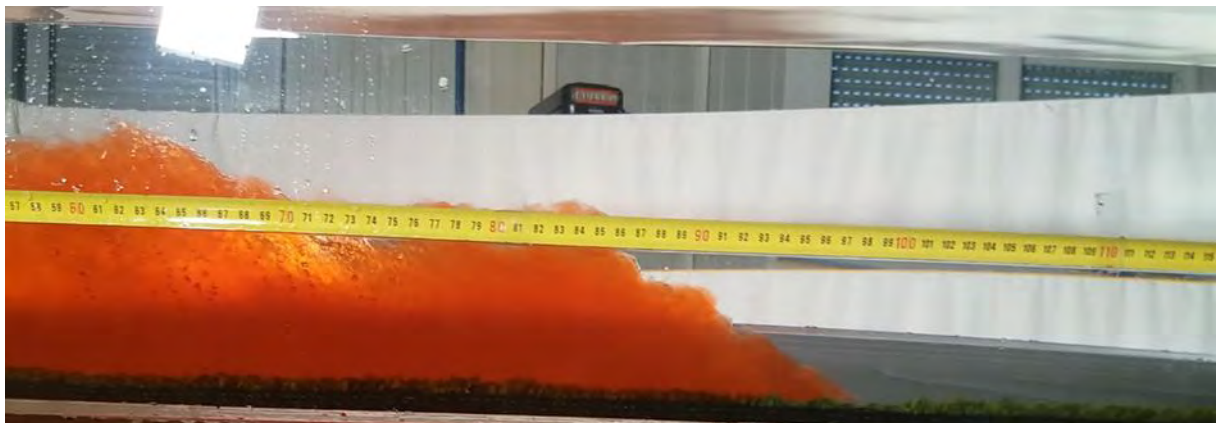


Εικόνα 7.62 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$





Εικόνα 7.63 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



Εικόνα 7.64 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



Εικόνα 7.65 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



Εικόνα 7.66 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



Εικόνα 7.67 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$



Εικόνα 7.68 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$   $H_0=25\text{cm}$